



EESTI MAAÜLIKOOL
Metsandus- ja maaehitusinstituut

Margarita Svežova

VÕRGU RTK MÕÕTESEERiate TÄPSUS

PRECISION OF THE DATA SERIES MEASURED BY
NETWORK RTK

Magistritöö
Geodeesia õppekava

Juhendaja: dotsent Harli Jürgenson, *PhD*

Tartu 2018

Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Magistritöö lühikokkuvõte	
Autor: Margarita Svežova		Õppekava: Geodeesia	
Pealkiri: Võrgu RTK mõõteseeriade täpsus			
Lehekülgi: 118	Jooniseid: 73	Tabeleid: 31	Lisasid: 13
Õppetool:		Geomaatika	
ETIS-e teadusvaldkond ja CERC S-i kood:		Geodeesia, P515	
Juhendaja(d):		Harli Jürgenson, <i>PhD</i>	
Kaitsmiskoht ja -aasta:		Tartu 2018	
<p>Käesoleva magistritöö eesmärgiks on uurida RTK meetodi täpsust ja selle stabiilsust Eesti erinevates püsijaamade võrkudes. Eesmärgi saavutamiseks viidi läbi kahetunnised RTK mõõteseeriad kasutades GPS, GLONASS ja Galileo satelliitsüsteeme ning Trimble VRS Now, HadNet, Maa-ameti RTN teenust ning üksikut RTK tugijaama. Sama võrgu teenust kasutades salvestati kaks andmeseeriat: esimest seeriat mõõdeti ainult GPS signaalidega ning teist GPS, GLONASS ja osalt ka Galileo signaalide abil. Galileo satelliitsüsteem oli kättesaadav ainult Trimble VRS Now võrgus. Välitööde ajal kasutati RTK lähima jaama (<i>Nearest station</i>) meetodit, i-MAX, RTK VRS ja kiirstaatilist (<i>Fast-Static</i>) mõõtmismeetodit.</p> <p>Mõõtmiseid sooritati perioodil 21.–28.11.2017 ajutisel geodeetilisel punktil, mis asub Kalina külas, Alutaguse vallas, Ida-Virumaal. Kasutati GNSS vastuvõtjat Trimble R4-3, väliarvutit Trimble Juno T41 ning andmete arhiveerimiseks ja analüüsimiseks Microsoft Excelit. Testpunkti alusväärtus määrati kahe tunnilise staatilise mõõtmisega ja järeltöötlusega programmis Trimble Business Center. MS Excelis leiti iga andmeseeria keskmine väärtus, standardhälbed ning X, Y koordinaadi ja ellipsoidaalse kõrguse erinevus testpunkti alusväärtusest. Samuti võrreldi kõigi mõõteseeriade keskmisi väärtusi staatilise mõõtmisega.</p> <p>Tulemuste põhjal võib öelda, et RTK ja võrgu RTK mõõtmiste tulemused kõiguvad mõne sentimeetri piires. Kõrgustes esineb vähesel määral üksikuid juhuslike vigu ka kuni 6 cm, standardhälbed jäävad siiski alla 2 cm. Parimad tulemused on saavutatud Trimble VRS Now ja Maa-ameti püsijaama võrgu VRS teenuse abil. Veidi jäid maha HadNet VRS, Toila baasjaama ja Maa-ameti võrgu i-MAX teenuse abil tehtud mõõtmiste täpsused. Esineb ka süstemaatilisi vigu. Samuti võib järeldada, et ainult GPS signaalidega mõõtes on ellipsoidaalse kõrguse täpsus enamasti parem kui GPS, GLONASS, Galileo signaalidega mõõtes. Eriti hakkab silma väiksem juhuslike vigade arv. Samas kombineeritud signaalidega mõõtmine tõstab X ja Y koordinaatide määramise täpsust.</p>			
Märksõnad: Võrgu RTK, GNSS, VRS, i-MAX			

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Master's Thesis	
Author: Margarita Svežova		Curriculum: Geodesy	
Title: Precision of the Data Series measured by Network RTK			
Pages: 118	Figures: 73	Tables: 31	Appendixes: 13
Chair:		Geomatics	
Field of research and (CERC S) code:		Geodesy, P515	
Supervisors:		Harli Jürgenson, <i>PhD</i>	
Place and date:		Tartu 2018	
<p>The aim of this Master's Thesis is to study the precision of the RTK method and its stability of different RTK base station networks (RTN) in Estonia. To achieve the aim two-hour RTK data series were measured using GPS, GLONASS, Galileo satellite systems and Trimble VRS Now, HadNet, Land Board RTN service and single RTK base station. Using the same network service two data series were saved: one series was measured by using only GPS signals and second series by GPS, GLONASS and Galileo signals. Galileo satellite system was available only in the Trimble VRS Now network. At the field nearest station RTK, i-MAX, VRS RTK correction streams were tested.</p> <p>Field work was conducted at the 21. november to 28. november 2018 at the temporary geodetic point, which is located in Kalina village, Alutaguse municipality, Ida-Viru county. In practical work GNSS receiver Trimble R4-3, handheld computer Trimble Juno T41 were used and program Microsoft Excel for archiving and analyzing the data series. The base value of the test point was determined by static measurements, postprocessing was made in Trimble Business Center package. Using MS Excel average value of each data series, standard deviations and differences of the X, Y and h in relation to testpoint was found. Also common average value from all data series have been compared against static measurement.</p> <p>Based on the results, it is visible that RTK measurements fluctuate within a few centimeters only. Occasionally the height error reaches up to 6 cm and standard deviation remains below 2 cm. The best results have been achieved using with Trimble VRS Now and Land Board VRS service. Shortly stayed behind measurements precisions, which were made with HadNet VRS, Toila base station and Land Board's i-MAX service. Also can be concluded that precision of ellipsoidal height, which is measured using only GPS signals, is better than height, measured using GNSS signals. Specially smaller number of occasional errors can be detected. Meanwhile, measurement with combined signals raises the X, Y coordinates precision.</p>			
Keywords: Network RTK, GNSS, VRS, i-MAX			

SISUKORD

SISSEJUHATUS.....	6
1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE.....	9
1.1. DGNSS tööpõhimõte.....	9
1.2. RTK mõõtmismeetod	11
1.3. RTN ehk võrgu RTK ja selle erinevad meetodid	12
1.3.1. Võrgu RTK meetod MAX.....	15
1.3.2. Võrgu RTK meetod i-MAX	16
1.3.3. Võrgu RTK meetod VRS	17
1.3.4. Võrgu RTK meetod FKP.....	19
1.3.5. Võrgu RTK meetodite võrdlus	19
1.3.6. Staatile ja kiirstaatile mõõtmismeetod	20
1.4. Erinevad satelliitsüsteemid.....	21
1.4.1. GNSS vigade allikas ja kõrvaldamise viise.....	22
1.4.2. Euroopa Galileo satelliitsüsteem	23
1.4.3. USA NAVSTAR GPS satelliitsüsteem	25
1.4.4. Venemaa GLONASS satelliitsüsteem	26
1.4.5. Hiina BeiDou satelliitsüsteem	27
1.5. Varasemate võrgu RTK täpsusuuringute ülevaade	28
1.6. Eesti GNSS püsijaamad ja võrgu RTK teenus	31
1.6.1. Trimble VRS Now.....	31
1.6.2. HadNet.....	32
1.6.3. Maa-ameti püsijaamade võrgu RTK teenus	34
1.6.4. Maa-ameti võrgu Toila baasjaam	35
1.7. Staatile mõõtmise jaoks kasutatud tugijaamad	36
1.7.1. Ahtme baasjaam	36
1.7.2. Kiviõli baasjaam.....	37
2. MATERJALID JA METOODIKA	39
2.1. Välitöodes kasutatud seadmed	39
2.2. Geodeetilise testpunkti rajamine	39
2.3. RTK mõõtmiste metoodika	41
2.4. Staatile mõõtmise metoodika.....	41
2.5. Mõõtmismeetodi seadistamine väliarvutis	42
2.6. RTK mõõdistuste käivitamine.....	43
3. TULEMUSED JA ANALÜÜS	44
3.1. Kindelpunktile kontrollväärtuse määramine staatile mõõtmise meetodiga	44
3.1.1. Mõõtmiste metoodika ja läbiviimine.....	44
3.1.2. Keskmiste väärtuste arvutamine.....	46
3.1.3. Staatile arvutuse analüüs.....	47
3.2. RTK testmõõtmiste kirjeldus ja analüüs.....	48
3.2.1. Tööde teostamise ajagraafik ja parameetrid	48
3.2.2. RTK mõõtmiste esialgne töötlus	49
3.3. Testmõõtmised ja tulemused Trimble VRS Now võrgu abil	50
3.3.1. Ainult GPS signaalide põhine mõõtmine	50
3.3.2. GPS, GLONASS ja Galileo signaalide põhine mõõtmine	54
3.3.3. Kahe mõõteseria omavaheline võrdlus – GPS versus GPS-GLONASS-Galileo ...	58
3.4. Testmõõtmised ja tulemused HadNet võrgu abil	58
3.4.1. Ainult GPS signaalide põhine mõõtmine	59
3.4.2. GPS+GLONASS signaalide põhine mõõtmine.....	62
3.4.3. Kahe mõõteseria omavaheline võrdlus – GPS versus GPS-GLONASS	66
3.5. Testmõõtmised ja tulemused Maa-ameti RTN võrgu VRS teenuse abil.....	67

3.5.1.	Ainult GPS signaalide põhine mõõtmine	67
3.5.2.	GPS+GLONASS signaalide põhine mõõtmine.....	71
3.5.3.	Kahe mõõteseeria omavaheline võrdlus – GPS versus GPS-GLONASS	74
3.6.	Testmõõtmised ja tulemused Maa-ameti võrgu i-MAX teenuse abil.....	75
3.6.1.	Ainult GPS signaalide põhine mõõtmine	75
3.6.2.	GPS+GLONASS signaalide põhine mõõtmine.....	78
3.6.3.	Kahe andmeseeria omavaheline võrdlus – GPS versus GPS+GLONASS.....	81
3.7.	Testmõõtmised ja tulemused Maa-ameti võrgu Toila baasjaama abil	82
3.7.1.	Ainult GPS signaalide põhine mõõtmine	82
4.	KOONDANALÜÜS JA ARUTELU	85
4.1.	Maksimaalsed juhuslikud vead	87
4.2.	Seeriaste keskmiste väärtuste õigsus	88
5.	KOKKUVÕTE.....	91
	KASUTATUD KIRJANDUSALLIKAD	95
	Summary	98
	LISAD	102
	Lisa 1. Trimble Zephyr 3 tehnilised parameetrid	103
	Lisa 2. Trimble NetR9 tehnilised parameetrid	104
	Lisa 3. Topcon G3 A1 tehnilised parameetrid	106
	Lisa 4. Topcon Legacy-E tehnilised parameetrid.....	107
	Lisa 5. Leica GR25 tehnilised parameetrid	108
	Lisa 6. Leica AR25 tehnilised parameetrid	109
	Lisa 7. Trimble R4-3 tehnilised parameetrid.....	110
	Lisa 8. Väliarvuti Trimble Juno T41 tehnilised parameetrid.	111
	Lisa 9. Baasjoone EEAH-1 satelliitide raport	112
	Lisa 10. Baasjoone EEAH-2 satelliitide raport	113
	Lisa 11. Baasjoone KIV2-1 satelliitide raport.....	114
	Lisa 12. Baasjoone KIV2-2 satelliitide raport.....	115
	Lisa 13. Mõõtmisdetailid (Survey raport) Trimble VRS Now võrku kasutades (GNSS)	116

SISSEJUHATUS

Käesoleva lõputöö teema on „Võrgu RTK mõõteseeriade täpsus“ ning eesmärgiks on uurida RTK (*Real Time Kinematic*) lahenduste täpsust ja stabiilsust Eesti erinevates tugijaamade võrkudes.

Tänapäeval on RTK ja võrgu RTK mõõtmismeetod väga levinud. Seda kasutatakse mitte ainult katastripunktide asukoha määramisel, vaid laialdaselt ka insenerigeodeesias, mis seab kõrgemaid täpsusnõudeid. RTK mõõtmismeetodi abil rajatakse mõõdistusvõrgu tugipunkte, viiakse läbi reaalseid mõõtmisi objektile ning kasutatakse kõrguse määramisel koos geoidi mudeliga.

Eestis on võrdlemisi vähe tähelepanu pööratud RTK tugijaamade võrkude teenuste täpsuse kontrollile. See võib tulla asjaolust, et teenust pakuvad erafirmad. Ühest küljest kasutus aina laieneb, teisest küljest puuduvad selged kvaliteedinõuded võrkudele. Enamik firmasid kasutab kommertstugijaamade teenuseid, mille töökorras hoidmine on teenusepakkuja enda mure. Maa-amet arvutab erafirmade tugijaamadele küll koordinaate, kuid ei analüüsi nende RTK väljundi täpsust. Seda ei tee ka Majandus- ja kommunikatsiooniministeerium, kelle haldusalas on ehitusgeodeetilised tööd. Käesoleva magistritöö kontekstis on analüüsitud pikemaajalisi RTK mõõteseeriaid, et näha põhjalikumalt kvaliteedi püsivust, sh hinnata juhuslike vigu.

Võrgu RTK täpsus on huvitanud mitmeid inimesi, leides käsitlemist ka Maaülikooli lõputöös. Even Kirs oma bakalaureusetöös uuris RTN (*Real Time Network*) täpsust äärealadel (Kirs 2017). Kirs jõudis järeldusele, et kasutaja asukoht GNSS püsijaamade suhtes ei mõjuta eriti mõõtmistulemuste täpsust ning võrgu äärealadel mõõtmistäpsus ei muutu kuigi palju. Sarnast teemat on uurinud ka Laura Orle ja Jane Hiop. Neid huvitas võrgu RTK teenusepakkuja ja andmeedastusformaadi mõju mõõtmistäpsusele ja initsialiseerimiseks kuluva ajale (Hiop, Orle 2016). Nende lõputöös tuli välja, et RTK GNSS püsijaamade erinev meetod mõjutab koordinaatide mõõtmistäpsust ja initsialiseerimisega. Kõige parema tulemuse sai Trimble teenus VRS Now.

Käesoleva magistritöö uuritakse võrgu RTK täpsust Eesti erinevates RTK püsijaamade võrkudes. Esiteks vaadatakse, kui hea tuleb pikema mõõtmise keskmine ja teiseks analüüsitakse juhuslikke ja süstemaatilisi vigu. Eraldi uurimisülesandeks on teha kindlaks, kas ainult GPS signaalidega mõõtes on mõõtmistäpsus parem ja juhuslikke vigu vähem, seda eriti kõrguse osas.

Analüüsitud on erafirmade tugijaamade võrke Trimble VRS Now ja HadNet ning Maa-ameti vastavat võrku. Kõik need kasutavad virtuaalse tugijaama loomisel erinevat tarkvara platvormi. Maa-ameti püsijaamade võrku analüüsiti nii VRS kui ka i-MAX teenuse kaudu. I-MAX parandite loomine erineb virtuaalse tugijaama loomise põhimõttest. Samuti erinevad kardinaalselt tugijaamade asukohad. Kuna tavakasutaja ei oska neid faktoreid enamasti hinnata, on selle töö fookuses just täpsuse hindamine.

Antud lõputöös on uurimismeetodiks kahetunnised RTK mõõteseriad erinevates tugijaamade võrkudes, kasutades erinevaid parameetreid. Põhiliseks parameetriks, mida muudeti, on GNSS signaalide kombinatsioon (ainult GPS signaalid või kõik GNSS signaalid). Kahetunnine mõõteseria annab ülevaate tulemuse stabiilsusest ja selle kõikumisest. Mõõtmised on läbi viidud ühel ja samal testpunktil Kalina külas, mis asub Mäetaguse aleviku lähedal. Punkti alusväärtus on leitud staatilise mõõtmisega, mida on võrreldud ka RTK kõikide mõõtmiste keskmisega. Staatilise mõõtmise töötlemiseks on kasutatud lähimaid punkte tugijaamade võrgus ja tarkvara Trimble Business Center.

Mõõteserieate andmed on eksporditud väliarvutist programmi MS Excel, kus on tehtud mõõtmistulemuste analüüs. Andmeseeriates on analüüsitud nii otseseid erinevusi alusväärtusest, standardhälvet kui min-max väärtusi. Lisaks eraldi veel üle 1 cm ja 2 cm suuruste vigade hulka. Samuti on koostatud histogrammid erinevuste esinemise sageduse visualiseerimiseks. Kõiki mõõtmisi on analüüsitud ka süstemaatilise vea osas, mille illustreerimiseks on koostatud X, Y koordinaadi osas punktdiagrammid ja kõrguse osas joondigrammid.

Mõõtmiste sooritamiseks on kasutatud seadmeid Trimble R4-3 ja väliarvutit Trimble Juno T41 koos tarkvaraga Trimble Access versiooniga 2015. Trimble R4-3 toetab ka Galileo satelliitsüsteemi signaale, mis annab võimaluse analüüsida selle mõju. Mõõtmised on tehtud kasutades kas ainult GPS signaale või GNSS signaale. Selline jaotus tulenes uurimisülesandest, et näha, kas ainult GPS signaalide kasutamine tõstab kõrgusliku

komponendi täpsust. Peab mainima, et Galileo süsteemi satelliite toetab vaid Trimble VRS Now. Lõputöös püstitatud hüpoteesiks on, et ainult GPS signaalidega mõõtes on kõrguses juhuslikke vigu vähem.

Käesolev magistritöö koosneb sissejuhatusest, teoreetilisest ja praktilisest osast ning kokkuvõttest. Teoreetiline osa hõlmab esimest peatükki ja sellele kuuluvaid alapeatükke. Selles osas on tutvustatud RTK tööpõhimõtet, RTN konseptsioone ning staatilist mõõtmist. Samuti on nendes peatükkides kirjutatud nüüdisajal töötavatest satelliitsüsteemidest ja Eestis funktsioneerivatest RTK püsijaamade võrkudest, nagu Trimble VRS Now, HadNet ja Maa-ameti püsijaamade võrk. Lõputöö praktiline osa koosneb teisest ja kolmandast peatükist ning nende alapeatükkidest. Praktilises osas on kirjeldatud ajutise geodeetilise punkti (testpunkti) rajamist, mõõtmisstiilide loomist väliarvutis, mõõtmistööde läbiviimist ning kasutatud seadmeid. Eraldi on esitatud tulemused mõõtmiste kohta ainult GPS- ja GNSS signaalidega. Andmeseeriade analüüsimine on tehtud võrkude kaupa ehk igas võrgus saadud andmeid hinnati omaette alapeatükis.

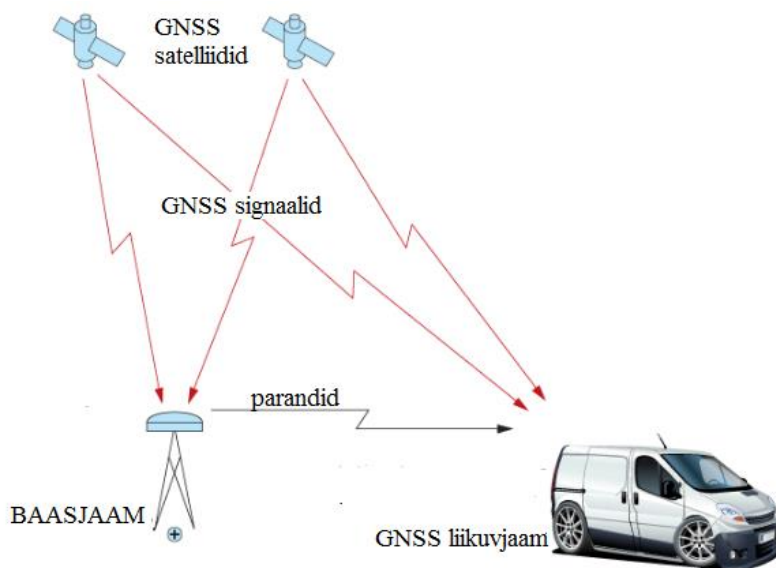
Kõik katsed on eraldi esitatud ja illustreeritud diagrammidega. Tulemuste väljatoomine eraldi oli vajalik, et olla võimeline katseid täpsemalt eristama. Lõputöö viimased peatükid koosnevad koondanalüüsist ja kokkuvõttest. Koondanalüüsis on esitatud koondtabelid ning neid võrreldud ja analüüsitud.

Avaldan suurt tänu lõputöö juhendajale Harli Jürgensonile igakülgse abi ja toetuse eest. Samuti tänan Aigar Nõgenet ja Aivar Aasmat osutatud abi ja grammatikavigade kontrollimise eest, samuti HadNet ja Trimble VRS Now võrkude haldajaid, kes varustasid mind vajalike tööfailidega. Kasutatud on ka HadNet ja Maa-ameti tasuta võrgu RTK teenust Maaülikoolile. Samuti on kasutatud Keskkonnaobservatooriumi projekti kaudu EMÜ Geomaatika laborile soetatud tehnikat, nagu Trimble R4-3 GNSS seade ja juhtarvuti Trimble Juno T41 ning Trimble Business Center tarkvara.

1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

1.1. DGNSS tööpõhimõte

DGPS teise nimetuse all DGNSS (*Differential Global Navigation Satellite System*) on diferentsiaalne ülemaailmne satelliidinavigatsioonisüsteem, mille eesmärgiks on parandada GNSS süsteemi täpsust. Baasjaam, mille asukoha koordinaadid on täpselt teada, võtab vastu GNSS signaale, arvutab pseudokaugusi satelliitideni ning tuvastab kaugusevigu. Baasjaam edastab veaparandeid vastuvõtjale, näiteks raadio teel. Vastuvõtja saab kätte GNSS signaale, arvutab pseudokaugusi ning rakendab parandeid. Parandatud kaugusi kasutatakse asukoha määramisel (joonis 1).



Joonis 1. DGNSS tööpõhimõte. Allikas:NovAtel Inc.

DGNSS-is baasjaama asukoht mõõdetakse kõrgtäpsusega, kasutades geodeetilisi meetodeid. Baasjaam mõõdab kaugusi GNSS-satelliitideni kasutades:

- koodipõhist positsioneerimismeetodit
- satelliitide asukohti, mis on teada tänu orbiitide efemeriiidele ja satelliidi ajale.

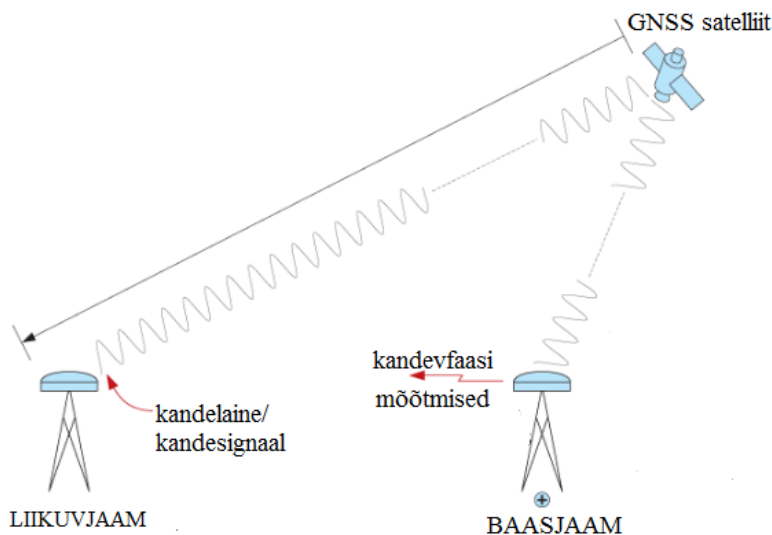
DGNSS (tabel 1) töötab hästi kui baasjaama ja vastuvõtja vahel on kuni mõnikümmend kilomeetrit.(NovAtel Inc 2017)

Tabel 1. DGNSS süsteemide võrdlus. Allikas: IAC

Parameetrid	DGNSS süsteemid			
	Lokaalne DGNSS (LAAS/GBAS)	Regionaalne DGNSS	Laia piirkonna DGNSS (WADGPS/SBAS)	ülemaailmne DGNSS (GDGNSS)
Koosseis	<ul style="list-style-type: none"> 1 või mitu mõõtmisandmete kogumisjaama andmeedastus kanal 	<ul style="list-style-type: none"> mõõtmisjaamade võrk andmeedastus kanalid arvutuskeskus 	<ul style="list-style-type: none"> regionaalne mõõtmisjaamade võrk andmeedastuskanalid arvutuskeskus maapealne juhtimiskompleks 	<ul style="list-style-type: none"> globaalne mõõtmisjaamade võrk andmeedastuskanalid arvutuskeskus maapealne juhtimiskompleks
Korrigeeriv informatsioon	<ul style="list-style-type: none"> kasutaja poolt mõõdetud navigeerimisparameetrite parandid informatsioon süsteemi terviklikusest 	<ul style="list-style-type: none"> kasutaja poolt mõõdetud navigeerimisparameetrite parandid informatsioon süsteemi terviklikusest 	<ul style="list-style-type: none"> efemeriidi-ajalise informatsiooni parandid kasutaja poolt mõõdetud navigeerimisparameetrite parandid informatsioon süsteemi terviklikusest 	<ul style="list-style-type: none"> efemeriidi-ajalise informatsiooni parandid parandid atmosfääri mõju kõrvaldamiseks signaalidelt kasutaja poolt mõõdetud navigeerimisparameetrite parandid informatsioon süsteemi terviklikusest
Andmeedastuskanalid	maapealsed andmeedastusliinid(näit. Interneti võrk)	maapealsed andmeedastusliinid(näit. Interneti võrk)	satelliitide sideühendused ja taasedastused	satelliitide sideühendused ja taasedastused
Tööpiirkond	50-200 km	400-2000 km	2000-5000 km	ülemaailmne kate
Asukoha määramise viga	1-5 cm	5-50 cm	50 cm – 2m	5 cm – 2m

1.2. RTK mõõtmismeetod

RTK (*Real-Time Kinematic* e. reaalaaja kinemaatiline) mõõtmismeetodit, mille täpsus on umbes 1 cm+1 ppm, kasutatakse väga laialdaselt. Liikuvjaama vigade vähendamiseks ja eemaldamiseks kasutatakse baasjaamas tehtud samaaegseid mõõtmisi. RTK (joonis 2) kasutab liikuvjaamapõhist nii koodi kui faasi vahede meetodit (*carrier-base ranging*) ning pakub kaugusi ja asukohti, mis on täpsemad autonoomsel ja üksnes koodipõhisel positsioneerimisel saadustest. Koodipõhisel positsioneerimisel arvutab liikuvjaam enda asukoha määrates kindlaks kaugused vähemalt nelja satelliidini. Kindlaks tehtud kaugused lubavad liikuvjaamal arvutada asukoha mõne meetri täpsusega. Liikuvjaamapõhise kauguse meetodi puhul edastab GNSS satelliit liikuvjaamale kandja tsükleid (*carrier cycles*), mille arv on kindlalt teada. Seejärel kasutab liikuvjaam tsükleid kauguse arvutamiseks. Samuti edastab GNSS satelliit kandelained nii liikuvjaamale kui ka baasjaamale. Omakorda saadab baasjaam parandid liikuvjaamale, mida see kasutab reaajas või hiljem järeltöötluses. RTK GPS/GNSS parandeid edastatakse reaajas referentsjaamalt liikuvjaamale, suurendades positsiooniandmete täpsust sentimeetritasemeni. (TransiTiva 2015, NovAtel Inc 2017)



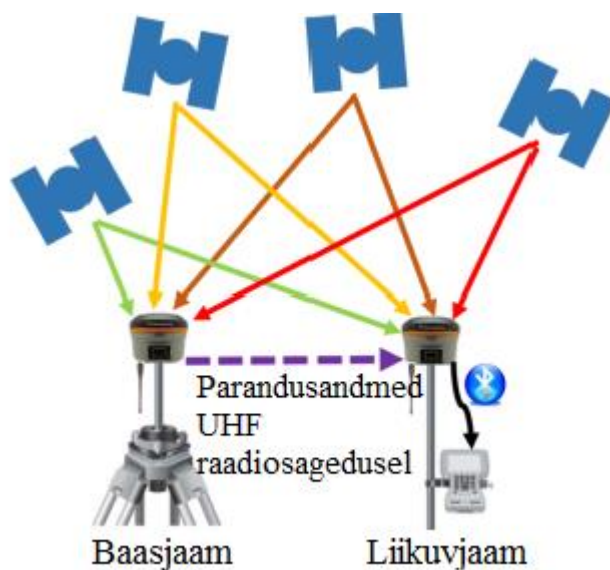
Joonis 2. RTK meetodi tööprintsip. Allikas:NovAtel.

Kahjuks sisaldavad liikuvjaamapõhise kauguse meetodi ajal arvutatud vahemaad satelliidi kella, ionosfääri ja troposfääri viivituste ja efemeriiidi vigu. Vigade kõrvaldamiseks vajatakse parandite edastust baasjaamalt liikuvjaamale.

Liikuvjaam määrab oma asukoha kasutades algoritme, mis sisaldavad ujuvlahendust (kandelaine tsüklite täisarvu kindlaks tegemine) ja diferentsiaalparandeid. Asukoha

määramise täpsus sõltub liikuvjaama kaugusest baasjaamast (nn baasjoon) ning diferentsiaalparandite täpsusest. Parandite täpsus sõltub baasjaama asukoha täpsusest ning baasjaama satelliitide signaali kvaliteedist. Liikuvjaama asukoha valik on väga tähtis, et vähendada keskkonna mõjusid, nagu häired ja signaali peegeldus.

RTK GPS/GNSS mõõtmine koosneb kohalikust baas-või referentsjaamast; ühest või mitmest liikuvjaamast. Kohalikul baasjaamal on kindlad geodeetilised koordinaadid. Baasjaam jälgib satelliidi signaale ja saadab informatsiooni liikuvjaama(de)le sidekanali kaudu, mis võimaldab baasjaamal edastada parandusandmeid reaalsajas. Joonisel 3 on kujutatud, kuidas liikuvjaam saab parandeid UHF-raadiosagedusel.



Joonis 3. Saadetud parandid kohalikult baasjaamalt. Allikas: TransiTiva.

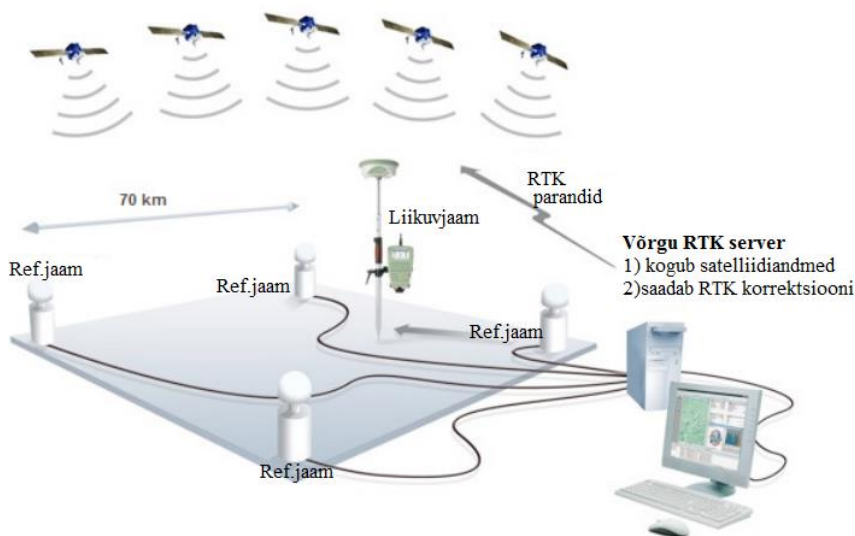
Liikuvjaam kombineerib enda tehtud mõõtmisi baasjaama omadega, kõrvaldades ionosfääri/troposfääri viivituse ja satelliidi kella vigu. Seejärel kasutatakse faasimõõtmisi asukoha määramiseks 2-5 cm täpsusega. (TransiTiva 2015)

Eestis on pärast GSM/GPRS side odavnemist kasutatud raadiosidet väga vähe.

1.3. RTN ehk võrgu RTK ja selle erinevad meetodid

RTN (*Real Time Network*) on reaalsajas mõõtmise tugijaamade võrk (joonis 4), mis koosneb vähemalt viiest referentsjaamast, mille vahekaugused on tavaliselt umbes 70 km. Võrgu RTK tööpõhimõte seisneb selles, et referentsjaamad pidevalt jälgivad satelliite ning

edastavad kogutud andmed keskserverisse, mis modelleerib atmosfääri kogu võrgu RTK ulatuses. Tihti kutsutakse seda ka terminiga võrgu RTK, mida on ka siin töös kasutatud.



Joonis 4. Võrgu RTK koosseis ja tööpõhimõte. Allikas: Leica SmartNet.

Võrgu RTK kasutaja täpne asukoht määratakse vajadusel, liikuvjaam edastab enda ligikaudse asukoha võrgu serverile. Seejärel arvutab ja edastab server parandusteavet RTK kasutajale. Tavaliselt liikuvjaam ja võrgu server on ühe-või kahe-suunalises sideühenduses. Sideühenduseks kasutatakse valdavalt GSM-i või Interneti ühendust, aga ka raadiomodemit (näiteks 900MHz, VHF, UHF). Internetiühenduse korral edastatakse parandeid NTRIP (*Network Transport of RTCM via Internet Protocol*) protokollina.

Kui liikuvjaam on parandid kätte saanud, siis arvutatakse asukoht sobiva algoritmiga. Algoritmi valik sõltub kasutatavast võrgu RTK meetodist, millest omakorda sõltub modelleerimise koht: võrgu RTK serveris või liikuvjaamas.

Võrgu RTK parandid viivad miinimumini kaugusest sõltuvate vigade mõju liikuvjaamale ja seda eriti võrgu piirides. Selleks tuvastab võrgu serveri tarkvara satelliitidelt tulenevaid viivitusi ja kasutab kõikide referentsjaamade andmeid parandite genereerimiseks. Võrgu RTK eelised ja puudused on ära toodud tabelis 2. (Leica Geosystems Limited)

Tabel 2. Võrgu RTK eeliste ja puuduste ülevaade

Eelised	Puudused
Ei ole tarvis osta ja paigaldada referentsjaama	Parandite saamise maksumus
Liikuvjaama arvutatud asukoha täpsus on ühtlasem	
Sama ala võib olla kaetud vähemate referentsjaamadega (st. võrreldes alatiste referentsjaamade arvuga, mida vajatakse ühekordse RTK võrdluse jaoks)	
Kõrgem RTK parandite usaldusväärsus ja kättesaadavus (nt. üks jaam on maas, siis teine jätkab tööd)	
Ei ole tarvis järeltöötlust ega andmeid korrigeerida vastavalt riiklikule võrgule	Võrgu RTK täpsus ei pruugi vastata samale täpsuse standardile kui üksik baasjaam lühikeste (mõne kilomeetri pikkustega) baasjoontega. St. et võrgu RTK lahendus 40 km kaugusel lähimast jaamast võib anda suurema tulemuse hajumise, kui üksik baasjaam, mis asub 3-4 km kaugusel.
Jälitatavus riiklikele kaardistamisorganisatsioonidele, st. ametlik maamõõdistamine, OSI ja LPS	
Kõrgem täpsus võrreldes ühe RTK pika baasjoonega	
Kahe liikuvjaama korral on suurem tootlikus võrreldes ühe baas-ja liikuvjaamaga	

Kokkuvõtteks võib näha, et võrgu RTK-l on plüsse rohkem kui miinuseid. Praktiliselt miinuseid üksiku tugijaama ees polegi kui mitte arvestada võrgu maksumust ja mõningat hajuvust täpsuses. (Leica Geosystems Limited)

Võrgu RTK-l on ka erinevad meetodid: MAX, i-MAX, FKP ja VRS, mille erinevusi kirjeldatakse järgnevates alapeatükidest. Meetodeid eristatakse järgmiste parameetrite alusel:

- **Standardiseeritud/mitte-standardiseeritud meetod** – võrgu RTK meetod on standardiseeritud, kui kasutab korrektsioonide arvutamiseks rahvusvahelistel standarditel põhinevaid algoritme (ja näiteks RTCM protokolliga edastust), mis on igaühele kätte saadavad. Mitte-standardiseeritud meetod kasutab parandite arvutamiseks mitte-avalikke algoritme, millele ligipääs puudub. (IVA Leon 2015)
- **Liikuvjaama/serveri poolt kontrollitud võrgulahendus** – sõltuvalt lahendusest kontrollib võrguarvutusi kas server või liikuvjaam.

Kui liikuvjaam kontrollib milliseid ja mitu referentsjaama kasutatakse ning millist strateegiat rakendatakse kaugusest tulenevate vigade vähendamiseks, siis on tegemist liikuvjaama poolt kontrollitud võrgulahendusega. Selle eelis peitub pidevas RTK lahenduse ja korrektsiooni kvaliteedi hindamises ja jälgimises. Juhul

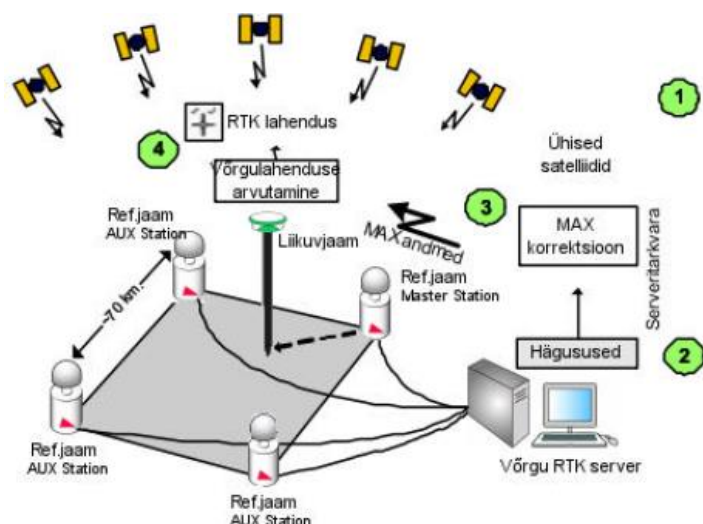
kui RTK lahendus ei ole optimaalne, siis liikuvjaam on võimeline koheselt ümber lülituma mõnele teisele strateegiale, mis säilitab initsialiseerimise ja optimaalse RTK lahenduse.

Serveri poolt kontrollitud võrgulahenduse korral kasutab server kõikide liikuvjaamade puhul sama strateegiat, ja serveri strateegia on optimaalne kogu võrgu RTK-le (mitte igale liikuvjaamale eraldi). Juhul kui võrgulahendus ei sobi liikuvjaamale mõnes olukorras, siis RTK lahendus ei saa olla optimeeritud ega saa tulla kiiret initsialiseerimist, kuna server ei ole teadlik liikuvjaamade tegelikust situatsioonist ehk mõõtmistingimustest.

- **Satelliitide andmete maksimaalne ärakasutamine.**
- **Jälgitavus ja korratavus** – jälgitavus on see, kus kõik mõõtmised peavad olema seotud füüsiliste objektidega ning mõõtmisi peab saama otseselt korrata. Kõik võrgu RTK mõõtmised peavad olema jälgitavad ja korratavad.
- **Järjepidevus ja jätkuvus** – võrgu RTK korral ei ole mõõtetäpsuse vähenemist seoses referents- ja liikuvjaama vahelise kauguse suurenemisega. Asukoht ja selle täpsus peavad olema ühtlased kogu mõõtmise ajal. (IVA Leon 2015)

1.3.1. Võrgu RTK meetod MAX

Võrgu RTK meetod MAX (*Master Auxiliary Corrections*) põhineb Master Auxiliary kontseptsioonil ning on loodud 2001. aastal Leica ja Geo++ poolt (joonis 5). MAX meetodi korral server saadab liikuvjaamale kõik satelliidiandmed ühelt referentsjaamalt (*Master Station*). Ülejäänutelt referentsjaamadelt (*Auxiliary Stations*) edastatakse lahendatud hägusustega jälgimisandmed ning koordinaatide erinevused peamise tugijaama suhtes.



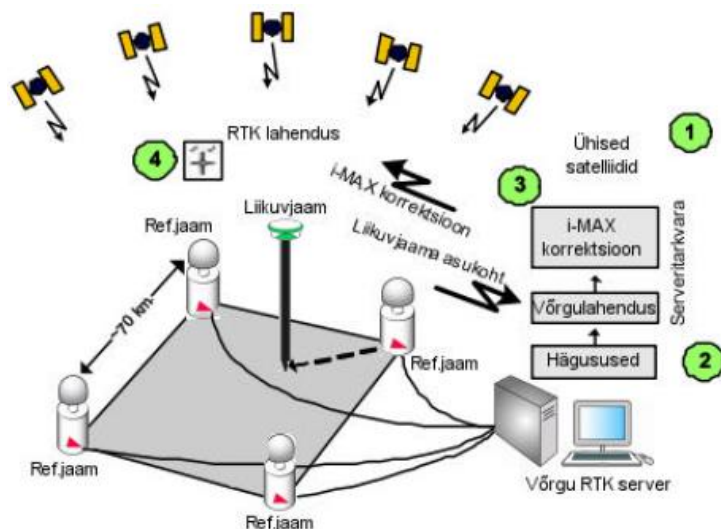
Joonis 5. MAX meetodi tööprintsip. Allikas: IVA Leon

MAX on standardiseeritud meetod, sest kasutab RTK korrektsioonide loomiseks avalikke algoritme. Kasutades MAX meetodit, jälgib liikuvjaam RTK lahendust ning on võimeline kiirelt muutma arvutusi, et optimeerida RTK lahendust. See tähendab, et võrgulahendust kontrollib liikuvjaam mitte server, nagu see on ülejäänud kolme võrgu RTK meetodite korral. MAX kasutab kõiki ühiseid satelliidiandmeid, millega liikuvjaam parandab ebatäpseid andmeid kasutades igat referentsjaama. MAX meetodi RTK lahendus on järjepidev ja jätkuv, kuna liikuvjaamal on võimalus kasutada vajaliku referentsjaama arvu, et kohaneda atmosfääritingimustega.

MAX meetodi käigus sooritatud mõõtmised on jälgitavad ja korratavad, kuna liikuvjaamal on võimalus mõõta baasjoont olemasoleva referentsjaamani. (IVA Leon 2015)

1.3.2. Võrgu RTK meetod i-MAX

Võrgu RTK meetod i-MAX (*Individualized MAX*) on loodud MAX meetodiga samal ajal. I-MAX on eraldi välja antud vanema tüübi vastuvõtjatele, mis ei toeta MAX meetodi parandeid. I-MAX (joonis 6) meetod sarnaneb VRS meetodiga. I-MAX meetod on klassifitseeritud individualiseerituna ning nõuab, et liikuvjaam saadaks oma umbkaudse asukoha võrgu RTK serverile.

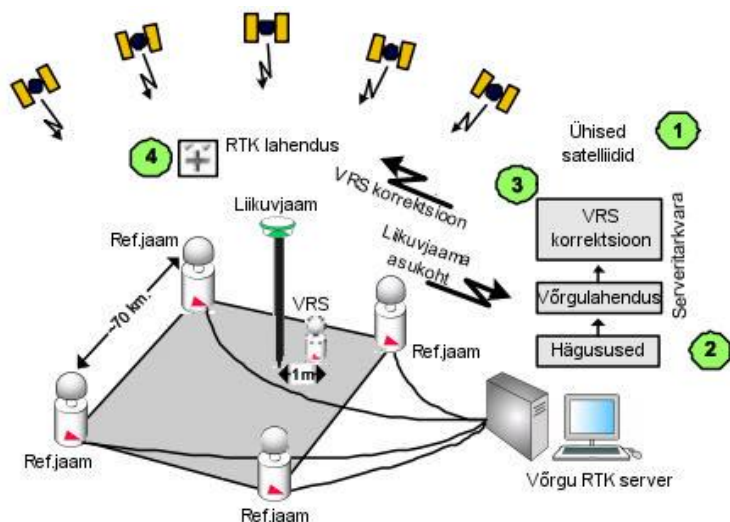


Joonis 6.I-MAX meetodi tööprintsip. Allikas: IVA Leon.

I-MAX kasutab avalikustamata algoritme RTK parandite genereerimiseks. Sarnaselt FKP meetodiga arvutab server võrgulahenduse vigade vähendamiseks. Satelliidiandmeid ei kasutata kogu võrgu ulatuses, kuna käesolev meetod loob RTK parandid, mis simuleerivad ühelt referentsjaamalt saadavat parandit. Selletõttu satelliidiandmete hulk on piiratud ning see võib põhjustada teatud olukordades RTK lahenduse saavutamata jäämist. I-MAX meetodi mõõtmised on jälgitavad ja korratavad, sest meetodi parandid on seotud kindla referentsjaamaga. I-MAX meetodi korrektsioon tagab liikuvjaama asukoha ja täpsuse järjepidevust, kuna korrektsiooni uuendatakse dünaamiliselt järgides pidevalt liikuvjaama asukohta. (IVA Leon 2015)

1.3.3. Võrgu RTK meetod VRS

Võrgu RTK meetod VRS (*Virtual Reference Station*, joonis 7) loodi 1990-ndate aastate lõpus firma Terrasat poolt, hiljem arendas seda edasi Trimble Incorporation. VRS meetod on klassifitseeritud individualiseerituna ning nõuab, et liikuvjaam saadaks oma umbkaudse asukoha RTK võrgu serverile.



Joonis 7. VRS meetodi tööprintsip. Allikas: IVA Leon.

VRS meetod ei kuulu standardiseeritud meetodite hulka, sest meetodis kasutatakse mitte-avalikke algoritme parandite genereerimiseks. VRS meetodi RTK lahendus ei ole sõltuv ühe baasjaama kaugusest, mis piirab RTK lahendust. See tähendab, et server arvutab võrgulahenduse kaugusest sõltuvate vigade vähendamiseks. Nagu i-MAX meetodi puhul, ei ole ka siin võrgu RTK satelliidiandmed maksimaalselt ära kasutatavad, sest kasutajale genereeritakse RTK korrektsioon ühelt virtuaalselt referentsjaamalt. Siiski peab mainima, et virtuaalne tugijaam omakorda on arvutatud paljude tugijaamade andmetest.

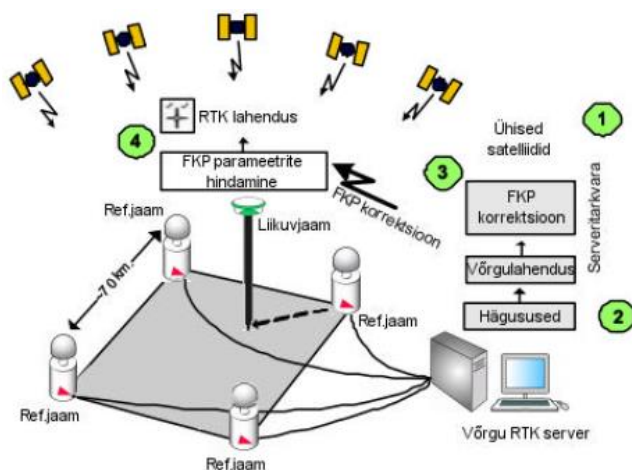
I-MAX ja VRS meetodite sarnasus ei tähenda meetodite identsust. Suur erinevus kahe meetodi vahel peitub parandite genereerimises referentsjaamale. I-MAX genereerib parandid tegelikule referentsjaamale, aga VRS meetod virtuaalsele referentsjaamale.

VRS meetodil sooritatud mõõtmised ei ole jälgitavad ega korratavad, sest liikuvjaam saab parandeid virtuaalselt referentsjaamalt mitte reaalselt referentsjaamalt. VRS meetodil ei ole järjepidevust ja jätkuvust. Sellepärast, et loodud parand on optimeeritud liikuvjaama asukohale mõõtmise algusest pärast serveriga ühendust. Kui liikuvjaama koht oluliselt muutub, siis korrektsioon ei pruugi olla asjakohane. Olukorra lahendus on mõõtesessiooni lõpetamises ning uue ühenduse loomises RTK serveriga. (IVA Leon 2015)

Samuti peaks mainima, et Leica ja Topcon VRS on sama idee, kuid siiski kasutatakse teisi algoritme kui Trimble VRS Now. Näiteks HadNet teeb virtuaalse tugijaama kaugemale (mitu km). Trimble VRS Now aga lähedale, alla 100 m.

1.3.4. Võrgu RTK meetod FKP

FKP (*The Flächen-Korrektur Parameter, Area correction parameters*) on vanim võrgu RTK meetod, mis oli välja arendatud Geo++ poolt 1990-ndate aastate keskel. FKP (joonis 8) on edastusmeetod, mis ei nõua liikuvjaama asukoha saatmist võrgu RTK serverile. Server modelleerib vahemaast tulenevaid vigu ning edastab RTK andmeid koos mudeliga ühelt referentsjaamalt. FKP genereerib ida-lääne ja põhja-lõuna kalded, mis sobivad ainult väikesele maa-alale referentsjaama ümbruses.



Joonis 8. FKP meetodi tööprintsip. Allikas: IVA Leon.

FKP on mitte-standardiseeritud meetod, kuna kasutab RTK parandite genereerimiseks mitte-avalikke algoritme. Võrgulahendust kontrollib server ning server arvutab kaugusest tulevate vigade vähendamiseks võrgulahenduse. Serveri poolt tehtud võrgulahendus võib piirata RTK lahendust, kuna ei ole optimeeritud liikuvjaama kohale. Satelliidiandmete täielikus ärakasutamises ei saa olla kindel, kuna FKP kasutab avalikustamata algoritme. FKP meetodil tehtud mõõtmised on jälgitavad ja korratavad, sest kätte saadavad parandid on seotud reaalse referentsjaamaga. FKP meetodi ajal arvutatakse jätkuvat RTK lahendust, kombineerides korrektsiooni RTK andmetega ühelt referentsjaamalt, arvestades, et liikuvjaam ei liigu referentsjaamast, mille abil FKP parameetrid on loodud, liiga kaugele (IVA Leon 2015). Antud töös ei ole FKP lahendust kasutatud.

1.3.5. Võrgu RTK meetodite võrdlus

Tabelis 3 on näha, et ainult üks võrgu RTK meetoditest – MAX – vastab kõigile kuuele normile.

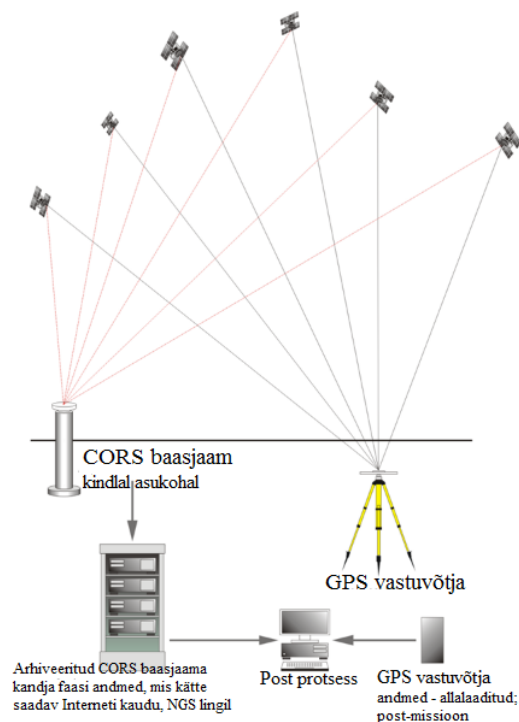
Tabel 3. Võrgu RTK meetodite võrdlus. Allikas: IVA Leon

Kriteeriumid	Võrgu RTK meetodid			
	MAX	i-MAX	VRS	FKP
Distsantsist tulenevate vigade vähendamine	jah	jah	jah	jah
Standardiseeritud meetod	jah	ei	ei	ei
Maksimaalne satelliidiandmete kasutamine	jah	ei	ei	jah/ei
Liikuvjaama poolt kontrollitav võrgulahendus	jah	ei	ei	ei
Järjepidevus ja jätkuvus	jah	jah	ei	jah
Jälgitavus ja korratavus	jah	jah	ei	jah

Samal ajal kui VRS meetod vastab ainult ühele normile ehk vähendab distantsist tulenevaid vigu. FKP meetodi korral ei saa üheseltmõistetavalt vastata küsimusele satelliidiandmete ära kasutamise kohta, kuna ei ole piisavalt informatsiooni selle kohta.

1.3.6. Staatile ja kiirstaatile mõõtmismeetod

Staatile mõõtmismeetodi (*static survey*) puhul kasutatakse kahte või enamat GNSS vastuvõtjat (joonis 9), mis mõõtmisessiooni jooksul ei liigu ning mõõdavad sünkroonselt kandelaine faase. Staatile mõõtmismeetodi tulemuseks on kõrgtäpne baasjoon ehk vastuvõtjate (või baasjaama ja vastuvõtja) vaheline kaugus. Staatile mõõtmismeetodi täpsus on vastastikuses seoses baasjoone pikkusega. Tavaliselt kasutatakse kiirstaatile mõõtmismeetodit alla 20 km baasjoonte korral ning selle täpsus on ca 1 cm tasemel.



Joonis 9. Staatilise mõõtmismeetodi tööpõhimõtte GNSS püsijaamade korral. Allikas: PennState.







Joonisel 9 on kirjeldatud staatilise mõõtmise töö-ja töötlemisprotsessi GNSS püsijaamade korral. CORS (*Continuously Operating Reference Station*) baasjaam ja GPS/GNSS vastuvõtja jälgivad ühel ja samal ajal samu satelliite. Hiljem CORS-i poolt saadud andmeid kogutakse, arhiveeritakse ja salvestatakse keskusesse. Andmed on pärast kätte saadavad Interneti teel. Staatilise mõõtmise ajal kogutud andmete töötlemisel: 1) väliarvutilt laetakse alla kogutud mõõtmisandmeid ja CORS baasjaama parandeid ning 2) käesolevad andmed laetakse üles programmi (nt. Trimble Business Center) ja arvutatakse baasjoont.

1.4. Erinevad satelliitsüsteemid

Globaalne satelliitnavigatsioonisüsteem ehk GNSS (*Global Navigation Satellite System*) on seotud kosmoses oleva satelliitide grupiga, mis edastavad positsioneerimis- ja ajaandmeid GNSS-vastuvõtjatele. Saadud andmeid kasutavad GNSS vastuvõtjad asukoha määramiseks.

Globaalse satelliitnavigatsioonisüsteemi hulka kuuluvad Euroopa Liidu Galileo, Ameerika Ühendriikide NavStar GPS, Venemaal GLONASS, Hiina BeiDou, India IRNSS e. NavIC ja Jaapanis QZSS süsteem (tabel 4).

Tabel 4. GNSS süsteemide ülevaade 2018. aasta seisuga. Allikas: NovAtel Inc, IAC

Parameeter	GNSS süsteem					
	Galileo	GLONASS	GPS	BeiDou	IRNSS	QZSS
Logo						
Satelliitide arv	27	24	27	14 (5 Geo, 5 IGSO, 4 MEO)	7	4
Lisavarustus	3	3	4	-	-	-
Orbiitide arv	3	3	6	3	2	3
Orbiitide idapikkus	56 ⁰	64,8 ⁰	55 ⁰	55 ⁰	32,5 ⁰ ... 129,5 ⁰	40 ⁰ ... 47 ⁰
Orbiidi raadius(km)	23 222	19 140	20 200	35 787; 35 787; 21 528	-	42 164

Kuna NavIC ja QZSS satelliitsüsteemide signaalid ei ole Eestis kättesaadavad, siis ei ole neid detailsemalt kirjeldatud järgnevates alapeatükkides.

1.4.1. GNSS vigade allikas ja kõrvaldamise viise

GNSS-i tulemuslikust hinnatakse nelja kriteeriumiga:

- Täpsus: vastuvõtja mõõdetud ja reaalse asukoha, kiiruse või aja vahe;
- Terviklikkus: süsteemi suutlikkus tagada usalduse lävi ja positsioneerimisandmete anomaalia korral häire;
- Järjepidevus: süsteemi võime toimida ilma katkestusteta;
- Kättesaadavus: signaali ajaprotsent, mis vastab ülaltoodud täpsusele, terviklikkuse ja järjepidevuse kriteeriumidele. (NovAtel Inc 2017)

GNSS süsteemidel esinevad veaallikad (tabel 5): satelliidi kell, orbiidi viga, ionosfääri ja troposfääri viivitused, vastuvõtja müra ja mitmeteelisus (*multipath*).

Tabel 5. GNSS süsteemi veaallikad. Allikas: NovAtel Inc

Veaallikas	Asukoha määramise viga (m)
Satelliidi kell	± 2
Orbiidi viga	± 2.5
Ionosfääri viivitus	± 5
Troposfääri viivitus	± 0.5

Vastuvõtja müra	± 0.3
Mitmeteelisuus/peegeldus	± 1

Satelliidi orbiite ja nende muutusi jälgib maapealne juhtimissüsteem. Juhtimissüsteem viivitamatult edastab parandusi satelliidile, juhul kui satelliidi orbiit peaks muutuma. Tänu sellele uuenevad satelliidi efemeriidid. Vaatamata saadetud parandustele ja uuendatud efemeriididele ikkagi esineb orbiidi viga, mis võib mõjutada autonoomset asukoha määramise täpsust kuni $\pm 2,5$ m. Orbiidi vea kõrvaldamiseks laetakse täpsed efemeriidid SBAS-süsteemilt või PPP-teenuselt. Samuti võib kasutada ka RTK meetodit.

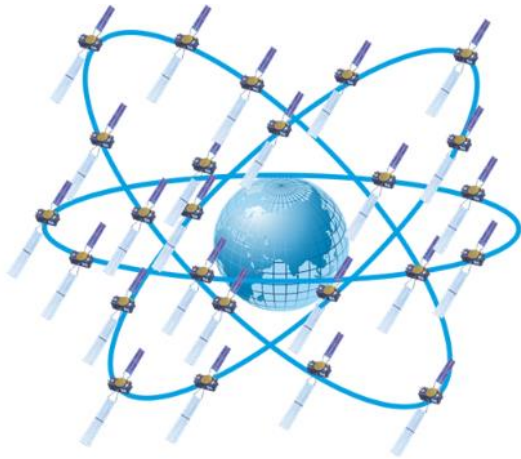
Ionosfäär koosneb ioonidest, mis mõjutavad satelliidisignaale ja võivad põhjustada satelliidi asukoha viga. Kuna ionosfääri viivituse suurus sõltub päikese aktiivsusest, asukohast, aasta- ja kellaajast, siis on raske hinnata selle mõju vastuvõtja asukoha määramise täpsusele. Satelliidipositsiooni vea kõrvaldamine sõltub ka GNSS vastuvõtja tüübist, näiteks kahesagedusega vastuvõtja teeb kindlaks viivituse suurust ning kõrvaldab selle arvutatud asukohast. Kuna kohalikus piirkonnas on ionosfääri tingimused sarnased ning baasjaam ja vastuvõtja koguvad sarnast viivitusaega, siis DGNSS ja RTK saavad kompenseerida viivitust.

Troposfääri viivitus sõltub kolmest tegurist: niiskusest, temperatuurist ja õhurõhust. Lisaks troposfääri ja ionosfääri viivituste eemaldusviisid on sarnased DGNSS ja RTK.

Vastuvõtja müra ehk GNSS vastuvõtja riist-ja tarkvara poolt põhjustatud asukoha määramisviga. Vea suurus on vahetult seotud GNSS vastuvõtjate kvaliteediga, näiteks kõrg-kvaliteediga GNSS vastuvõtjatel asukoha määramise viga on väiksem võrreldes madala kvaliteediga vastuvõtjatega. (NovAtel Inc 2017)

1.4.2. Euroopa Galileo satelliitsüsteem

Galileo on Euroopa ülemaailmne satelliitnavigatsioonisüsteem (joonis 10), mis kannab tuntud Itaalia päritoluga füüsiku, matemaatiku, filosoofi ning astronoomi Galileo Galilei nime. Aastast 2004 on Ameerika Ühendriigid ja Euroopa Liit teinud tihedat koostööd GPS ja Galileo ühilduvuse ja koostalitlusvõime tagamise eesmärgil. Galileo satelliitsüsteem on võimeline tegema koostööd ka GLONASS süsteemiga. (NovAtel 2017)



Joonis 10. Galileo satelliidikonstellatsioon. Allikas: IAC.

Galileo tehnoloogia esimene katsesatelliit saadeti orbiidile 2005. aastal. Kui võrrelda Galileo süsteemi GPS ja GLONASS süsteemidega, siis erinevalt nendest asub Galileo täielikult tsiviilkontrolli all.

Galileo maapealne segment koosneb kahest Galileo kontrollkeskustest (Galileo Control Centres e. GCC), mis asuvad Oberpfaffenhofen'is Saksamaal ja Fucino's Itaalias. Iga kontrollkeskus jaguneb kaheks osaks: maapealseks kontrollsegmentiks (*Ground Control Segment* e. GCS) ja maapealseks missioonisegmentiks (*Ground Mission Segment* e. GMS). GCS tegeleb satelliitide haldamisega ja satelliidi konstellatsiooni hooldamisega. Kontrollsegment teostab satelliitide ja kasuliku koormuse kontrollimist, seiret ja valmistab ühist informatsiooni ning edastab selle satelliidile. Galileo edastab 11-s diapsoonis signaale sagedusel 1176,45 MHz kuni 1575,42 MHz (tabel 6).

Tabel 6. Galileo süsteemi signaalide ülevaade. Allikas:NovAtel Inc

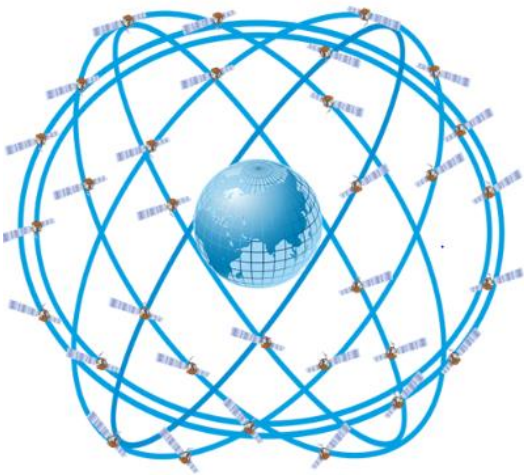
Tähendus	Sagedus (MHz)	Kirjeldus
E1 A	1575.42	Avalikult reguleeritud teenussignaal
E1 B	1575.42	Eluohutus ja avatud teenussignaal (andmetega)
E1 C	1575.42	Eluohutus ja avatud teenussignaal (andmeteta)
E5a I	1176.45	Avatud teenussignaal (andmetega)
E5a Q	1176.45	Avatud teenussignaal (andmeteta)
E5b I	1207.14	Eluohutus ja avatud teenussignaal (andmetega)
E5b Q	1207.14	Eluohutus ja avatud teenussignaal (andmeteta)
AltBOC	1191.795	Kombineeritud signaal E5a/E5b-st

E6 A	1278.75	Avalikult reguleeritud teenussignaal
E6 B	1278.75	Kommertsteenuse signaal (andmetega)
E6 C	1278.75	Kommertsteenuse signaal (andmeteta)

Välitööde ajal kasutatud seade Trimble R4-3 on võimeline kasutama signaale: E1A, E5A ja E5B.

1.4.3. USA NAVSTAR GPS satelliitsüsteem

GPS-il (joonis 11) (*Global Positioning System*) ehk ülemaailmsel asukoha määramise süsteemil on olemas ka ametlik nimetus NAVSTAR. GPS on loodud Ameerika Ühendriikides ja see oli esimene GNSS süsteem. Esmakordselt saadeti NAVSTAR-i satelliidid orbiidile USA kaitseministeeriumi käsul 1970-ndate aastate lõpus ja 1980-ndate alguses. Pärast seda saadeti kosmosesse mitu satelliitide põlvkonda, mida nimetatakse plokkideks. Alguses said GPS-i kasutada ainult sõjaväelased ning hiljem, 1983. aastal, ka tsiviilelanikud.



Joonis 11. GPS süsteemi satelliidikonstellatsioon. Allikas: IAC.

GPS süsteem edastab signaale kolmes diapsoonis sagedusel 1176.45 MHz kuni 1575.42 MHz (tabel 7).

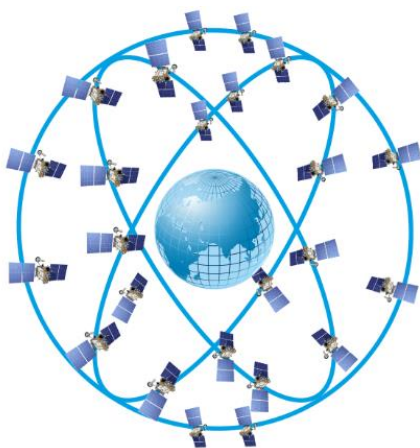
Tabel 7. GPS süsteemi signaalide ülevaade. Allikas:NovAtel Inc

Tähendus	Sagedus (MHz)	Kirjeldus
L1	1575.42	Moduleeritakse C/A ja P koodide abil ning on ära krüpteeritud sõjaväeliste ja teistele volitatud isikute jaoks
L2	1227.60	Moduleeritakse P koodiga. L2C kasutatakse tsiviilotstarbeks alates 2018.aastast
L5	1176.45	Kättesaadav alates IIF plokk satelliitidelt

Antud töös kasutatud seade Trimble R4-3 on võimeline kasutama signaale: L1 C/A, L1C, L2C ja L2E.

1.4.4. Venemaa GLONASS satelliitsüsteem

GLONASS-i (*Globalnaja Navigatsionnaja Sputnikovaja Sistema*) ehk ülemaailmse navigatsiooni satelliidisüsteemi kallal hakati töötama 1972. aastal. 1982. aastal saadeti orbiidile esimene GLONASS-i satelliit. 1993. aastal (joonis 12) võeti GLONASS Vene kaitseministeeriumi kontrolli alla ning satelliitsüsteemis oli 8 satelliiti. (NIS 2017)



Joonis 12. GLONASS satelliidikonstellatsioon. Allikas: IAC.

GLONASS-i maapealne segment koosneb süsteemi kontrollkeskusest, mis asub Krasnoznamenskis; kaheksast seirejaamast ja kesksünkronisaatorist. Kesksünkronisaator tagab süsteemi ajaskaala kujunemist ning kontrolljaamad võtavad vastu telemeetria andmeid ja edastavad informatsiooni satelliitidele. (IAC 2017)

GLONASS edastab signaale kahes diapsoonis (L1 ja L2; tabel 8) kaheteistkümmel sagedusel. GLONASS süsteemi kasutatakse ka geodeesia ülesannete lahendamisel.

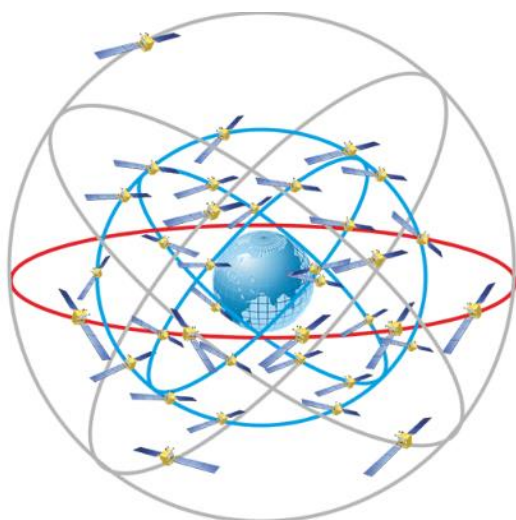
Tabel 8. GLONASS süsteemi signaalide ülevaade. Allikas: NovAtel Inc

Tähendus	Sagedus (MHz)	Kirjeldus
L1	1598.0625 - 1609.3125	Moduleeritakse HP(<i>high precision</i>) ja SP(<i>standard precision</i>) signaalidest
L2	1242.9375 - 1251.6875	Moduleeritakse samamoodi nagu L1 ning SP kood on identne L1-le edastatud andmetega

Mõõtmiste ajal kasutatud seade Trimble R4-3 on võimeline kasutama signaale: L1 C/A, L1P, L2 C/A, L2P ja L3.

1.4.5. Hiina BeiDou satelliitsüsteem

BeiDou (hiina k. Suur Vanker) on Hiina rahvuslik piirkondlik navigatsioonisüsteem (Joonis 13 13), mille loomine algas 1994. aastal. 2000. aastal saadeti orbiidile kaks geostatsionaarset satelliiti Beidou-1A ja Beidou-1B. 2003. aastal saadeti kolmas geostatsionaarne satelliit Beidou-1C, mis parandas oluliselt kogu navigatsioonisüsteemi kasutust. 2004. aastal loodi teine satelliitide põlvkond Beidou-2, mis sobib kokku Beidou-1. 2012. aastaks saadeti orbiidile 14 satelliiti, millest 5 geostatsionaarsele orbiidile (GEO-*Geostationary Earth Orbit*), 4 keskmisele orbiidile (MEO-*Medium Earth Orbit*) ning 5 geosünkroonsele kaldega orbiidile (IGSO-*Inclined Geosynchronous Orbit*).



Joonis 13. BeiDou satelliidikonstellatsioon. Allikas: IAC.

2020. aastaks hakkab BeiDou süsteem koosnema 35 satelliidist, millest 5 satelliiti, BeiDou-G, paigutatakse geostatsionaarsele orbiidile, 27 satelliiti BeiDou-M keskmisele ringorbiidile ning 3 satelliiti BeiDou-IGSO asetatakse geosünkroonsetele kaldega kõrgorbiitidele.

Tabel 9. BeiDou süsteemi signaalide ülevaade. Allikas:NovAtel Inc

Tähendus	Sagedus (MHz)	Kirjeldus
B1	1561.098	edastab nii avaliku sektori signaale kui ka piiratud juurdepääsuga signaale
B2	1207.140	edastab nii avaliku sektori signaale kui ka piiratud juurdepääsuga(kinniseid) signaale
B3	1268.520	edastab ainult piiratud juurdepääsuga(kinniseid) signaale

Tabelis 9 on näha, et BeiDou süsteem edastab signaale kolmes diapsoonis B1, B2 ja B3 ning sagedusel 1207,140 MHz kuni 1561,098 MHz. BeiDou süsteemi olen kasutanud Trimble VRS Now võrgus ning GNSS seade Trimble R4-3 on võimeline kasutama B1 ja B2 signaale.

1.5. Varasemate võrgu RTK täpsusuuringute ülevaade

Võrgu RTK täpsust on uurinud paljud teadlased. Artiklis „Measurement accuracy in Network-RTK“ autorid (Emardson *et al.* 2009) on tutvustanud võrgu RTK Rootsipüsijaamade võrgu SWEPOS näitel. Võrgu RTK-st kirjutati kolmes osas: esimeses anti hinnang 2009. aasta seisuga võrgu RTK-le; teises osas vaadeldi, kuidas võrgu RTK võib muutuda paremaks, kui SWEPOS võrgule rajada püsijaamu juurde. Viimases osas analüüsiti GNSS süsteemi konstellatsiooni täiendamist ja signaalide L1 ja L3 positiivset mõju võrgu RTK täpsusele.

Artiklis on pööratud suurt tähelepanu satelliidi kella ja orbiidi vigadele, iono-ja troposfääri mõjudele ning vastuvõtja asukohale, kuna see võib põhjustada signaalide mitmeteelisust. 2009. aastal kirjutatud artiklis soovitati, et kui Galileo ja BeiDou saavad valmis ning neid saab kasutada RTK mõõtmistel, siis lõikenurgaks võib valida 13⁰ kuni 25⁰. Samuti uute GNSS süsteemide kasutamine aitab vähendada vertikaalset viga, mis peaks langema 27

mm-lt 20 mm-le. Mõlema aspekti koosmõju (nii tihendatud võrgu kui ka Galileo ja BeiDou süsteemide kasutamine) vähendab vertikaalset viga alla 14 mm-le.

Jansseni ja Haasdyki 2011. aasta artikli eesmärk oli uurida üksiku baasjaama RTK ja võrgu RTK toimivust väljaspool Sydney linna Uus-Lõuna Wales'is. Eesmärgi saavutamiseks muudeti üksiku baasjaama RTK baasjoonte pikkusi ning valiti erinevaid asukohti katsete läbiviimiseks. Uuringuid viidi läbi 4 erineval asukohal kasutades Leica Viva GNSS vastuvõtjat. Iga testi ajal paigaldati mitu GNSS vastuvõtjat üksteise kõrvale, jälgides, et võrgu RTK režiim vastaks VRS mõõtmismeetodile. Selleks, kasutati andmeid ümbritsevast kohalikult püsijaama võrgult CORSnet-NSW (*Continuously Operating Reference Stations fundamental positioning infrastructure for New South Wales*) või üksiku baasjaama RTK režiimi. Kõik vastuvõtjad salvestasid andmeid reaalaajas 1 sekundilise intervalliga kolm päeva järjest. Tulemuseks saadi 260 000 epohhi iga kasutatud vastuvõtja kohta. Mõõtmistulemuste täpsust võrreldi 11-15 geodeetilise kindelpunktiga. Artiklis jõuti järeldusele, et võrgu RTK ei erine palju üksiku baasjaama RTK-st, kuid pakub siiski paremat täpsust. Lisaks tuvastati, et võrgu RTK täpsus on 12 mm horisontaalasendis ja ~21 mm vertikaalasendis, kui CORS jaamade baasjoonte pikkus on ligikaudu 30 km. Juhul kui CORS-ide vahekaugus on 108 km ning kaugus lähima püsijaamani on 50 km, siis on täpsus kõrguses 25 mm ja X, Y koordinaatides 60 mm. Artikli autorid soovivad kasutatada võrgu RTK meetodit ainult püsijaamade võrgu sisepiirkonnas.

2002. aastal kirjutatud artiklis on uuritud Singapuris toimiva püsijaamade võrku SIMRSN (*Singapore Integrated Multiple Reference Station Network*). SIMRSN on ülikooli hallatav võrk, mis töötab nii uuringu üksusena kui ka võrgu RTK-na, mille teenuseid kasutavad kohalikud geodeedid. Võrgu loojateks on Nanyangi Tehnikaülikool, Uus-Lõuna Wales'i ülikool ja Singapuri Maa-amet. Singapuri püsijaama võrk koosneb viiest baasjaamast, mis töötab 24 tundi päevas. Võrgu baasjaamade vahekaugused on maksimaalselt paar kümmend kilomeetrit. 2001. aastal läbiviidud katsed näitasid, et isegi niisuguste suhteliselt lühikeste baasjoonte korral võrgu RTK-l esineb raskusi ionosfääri viivituse modelleerimisega ekvatoriaalsetel laiuskraadidel. (Rizos 2002)

Austraalia teadusnõukogu projekti eesmärk oli parendada Victoria GPS võrku (Victoria's GPSnet), arendades piirkondlike atmosfääri parandusmudeleid, mis tagaksid kõrgtäpsust reaaliajapositsioneerimises (Ge *et al* 2013). Projektis osalesid teadlased RMIT ülikoolist, Uus-Lõuna ülikoolist, Victoria Jätkusuutlikuse ja keskkonna ametist ning Uus-Lõuna Maa-

ametist. Hõreda CORS võrgu RTK toimivuse hindamiseks sooritati mitu katset. Katse eesmärgiks oli hinnata võrgu RTK VRS meetodit, kui baasjaamade vahekaugus on pikem kui 70 km. Katseid viidi läbi kahesagedusliku seadmega, mis oli paigaldatud Melbourne'i ülikooli katusele. Parandusandmeid saadi CORS võrgult VRS meetodi abil. Uuringute ajal oli kogutud kaks andmeseeriat, esimene november-detsember 2005 ja teine juunis 2006. Katset jaotati viide etappi: 1) täpsus ja reeglipärasus; 2) igapäevane korratavus; 3) vastuvõtja sisekauguse mõju; 4) võrdlus erinevate vastuvõtjate tootjate vahel; 5) erinevate andmeedastusformaatide eelised ja puudused.

Katse esimese etapi eesmärk on hinnata reeglipärasust (Gordini *et al* 2006) ja VRS võrgu lahenduse täpsust soovitatud püsijaama vahekaugustega (70 km). Püstitatud eesmärgi saavutamiseks kasutati MELBpos võrku. 48 tunnilise katseaja jooksul 99% kandefaasi tundmatutest oli lahendatud. Saavutati täpsus 0,4 cm X koordinaadis, 0,6 cm Y koordinaadis ja 1 cm kõrguses.

Katse teise etapi eesmärk on hinnata lahenduse igapäevast korratavust. Selleks kasutati samasugust meetodikat nagu esimese etapi puhul ehk Leica AX1202 antenn jaotab GPS signaali kahe Leica GX1230 vastuvõtja vahel. Esimene vastuvõtja on ühendatud CCC ja MELBpos teenusega ning teine vastuvõtja on ühendatud CCC ja testvõrguga, mida nimetatakse MelbUniTest. Testvõrk MelbUniTest simuleerib VICpos teenust Victoria osariigis, kus vastuvõtja vahekaugused on pikemad kui 130 km. MelbUniTest võrku seadistati nii, et jäeti välja kõik püsijaamad, mis asusid ligemal kui 65 km. Andmeid koguti kahe päeva jooksul (152 ja 153 GPS nädal 1377 4/5) ning VRS jaama loomiseks kasutati MELBpos ja MelbUniTest võrgu teenust. MELBposi abil saadud lahenduse korratavus kinnitas esimeses etapis saadud reeglipärasust ja täpsust ehk kõrguslik standardhälve on väiksem kui 1 cm. Võrreldi ka Trimble 5700 ja Leica GX 1230 vastuvõtjad 6 tunni jooksul. Märkimisväärseid erinevusi ei tuvastatud.

Katse viimase etapi eesmärk on hinnata erinevate andmeedastusformaatide suutlikkust. VICpos võrgus oli kasutatud Trimble Zephyr Geodetic antenn ning kaks Leica GX1230 vastuvõtjat VRS režiimis. Andmeid salvestati iga sekundi tagant 34 tunni jooksul ning andmeedastusformaadiks oli RTCM 3.0 ja RTCM 2.3. Tulemustes on näha, et mõlemal andmeedastusformaadil on sarnane täpsus, standardhälve 2-6 cm.(Gordini *et al.* 2006)

1.6. Eesti GNSS püsijaamad ja võrgu RTK teenus

Tänapäeval on Eestis kättesaadavad Trimble, Hadese ja Maa-ameti võrgu RTK teenused. Kõik need võrgud olid kasutatud välimõõtmiste ajal ning neid kirjeldatakse ka järgmistes alapeatükkides.

1.6.1. Trimble VRS Now

Trimble VRS Now on loodud Trimble Inc poolt 2009. aastal Eestis, mille ametlikuks esindajaks on OÜ Geosoft. Trimble VRS Now on üleriiklik teenus, mis pakub maamõõtjatele kohest juurdepääsu RTK GNSS parandustele. VRS teenus on toodud Eesti turule Trimble firma poolt. Eesti territooriumil on Trimble VRS Now võrgul 19 baasjaama.

Joonisel 14 on näha, et testpunkt paikneb isegi võrgust veidi väljaspool, mida aga kompenseerib Ahtme baasjaama lähedus. Siiski, kui tõmmata joon Narva ja Emumäe baasjaamade vahele, jääb testpunkt ikkagi võrgu sisealale. Kahjuks puudub tugijaam Peipsi järve põhjakaldal.



Joonis 14. Trimble VRS Now võrgu leviala Eestis 2018.aastal ja testpunkti asukoht. Aluskaardina on kasutatud Maa-ameti maakondade kaardikihti ning püsijaamad on saadud Maa-ameti GPA-st.

Antud võrgus saab kasutada RTK, H-Star (ametlik edasimüüja AlphaGIS) ja DGNSS teenust ning võrk toetab GPS, GLONASS, BeiDou, Galileo ja QZSS süsteeme. Kusjuures süsteemide tugi sõltub kasutaja asukohast ja vastuvõtja omadustest (tabel 10, Trimble Inc)

Tabel 10. Trimble VRS Now võrgu teenused Eestis. Allikas: Trimble Inc

Trimble VRS Now teenused	Täpsus (cm)	Teenuse rakendusala	Teenuse-hind aastas (€)
Võrgu RTK	horisontaalne: 1-3 vertikaalne: 1-5	<ul style="list-style-type: none"> • geodeesia • ehitus • täppispõlluharimine • masinkontroll 	1195
H-Star	horisontaalne: 10-30	<ul style="list-style-type: none"> • kaardistamine • GIS 	595
DGNSS (NetDGNSS)	horisontaalne: 50-100	<ul style="list-style-type: none"> • navigeerimine • andmekogumid 	295

*Teenusehinnad ei sisalda käibemaksu.

Tabelis 10 on näha, et H-Stari teenuse horisontaaltäpsus on kümme korda kehvem kui RTK teenuse täpsus, mille tõttu H-Stari teenust kasutatakse GIS-is.

1.6.2. HadNet

Teine GNSS võrk, mille teenuseid kasutati testpunkti mõõtmistel on HadNet (joonis 15). HadNet võrku hooldab ja haldab Hades Invest OÜ. Võrk väljastab VRS põhimõtele rajatud teenust, mis on Topconi firma poolt arendatud. Tänapäeval on HadNet võrgul 28 GNSS püsijaama Eesti territooriumil ja kolm püsijaama Lätis. Eesti saarestikus on 6 püsijaama, mille tõttu on saared hästi kaetud VRS võrgu levialaga. Kõikide püsijaamade nimed ja koordinaadid, mis asuvad Eestis, on kantud Maa-ameti registrisse.



Joonis 15. HadNet võrgu leviala Eestis 2018.aastal ja testpunkti asukoht. Aluskaardina on kasutatud Maa-ameti maakondade kaardikihti ning püsijaamade asukohtade koordinaadid on saadud Hades Invest OÜ Tõnu Kellerilt.

Joonisel 15 on näha, et testpunkt paikneb selgelt HadNet võrgu sees, kuna üks tugijaamadest paikneb ka Vasknarvas.

Tabelis 11 võib võrrelda omavahel HadNet võrgu RTK teenuse liitumishindu. Ühe aasta liitumishind on 80 euri kuus, mis tähendab, et terve aasta liitumishind on 960 euri. (Hion 2012)

Tabel 11. HadNet võrgu liitumishinnad 2018. aasta seisuga (Hion 2012)

Liitumine	Hind (€)	Liitumine	Koefitsent	Aastase liitumise korral
1 päev	15	I	1,0	80 €/kuu
1 nädal	50	II	0,8	64 €/kuu
1 kuu	100	III	0,7	56 €/kuu
1 aasta	80 EUR/kuu	IV	0,6	48 €/kuu
		V	0,5	40 €/kuu

Võrk tegutseb küll VRS ideoloogiat kasutades, mis vaatamata sellele ei ole identne Trimble VRS Now algoritmidega (Geotrim OY, isiklik kommentaar H.Jürgensoni kaudu).

1.6.3. Maa-ameti püsijaamade võrgu RTK teenus

2007. aastaks koosnes Maa-ameti GNSS püsijaamade võrk (joonis 16) viiest püsijaamast: Suurupi, Kuressaare, Audru, Tõravere ja Toila. 2008. aastaks oli võrku lisatud veel kolm püsijaama Kärddlas, Mustvees ja Võrus. Aastavahemikul 2014-2016 toimusid rekonstrueerimise tööd Eesti-Šveitsi koostööprogrammi raames, kus oli vahetatud välja 9 püsijaama seadmestik ning paigaldati veel 19 püsijaama.



Joonis 16. Maa-ameti võrgu leviala Eestis 2018.aastal ja testpunkti asukoht. Aluskaardina on kasutatud Maa-ameti maakondade kaardikihti ja püsijaamade koordinaadid on võetud Maa-ameti GPA-st.

Joonisel 16 on näha, et testpunkt paikneb selgelt võrgus, seda tänu Alajõe baasjaamale. Kõige ühtlasemalt on kaetud testpunkti ümbrus tugijaamadega Maa-ameti võrgus.

Võrgu püsijaamadel kasutatakse Leica GR25 GNSS vastuvõtjaid ja AR25 choke ring tüüpi GNSS antennid koos Leica kate. Püsijaamade võrgu tugevaks küljeks on see, et 13 asukohas on paigaldatud meteosensorid, mis fikseerivad täpseid ilmastikunähtusi püsijaamade asukohas (Maa-amet 2018). Maa-ameti võrk annab välja nii i-MAX kui VRS teenust. Viimane toodi turule mõni aasta tagasi ja erineb algoritmide poolest Trimble VRS teenusest.

1.6.4. Maa-ameti võrgu Toila baasjaam

Toila baasjaama on kasutatud siinses uuringus üksiku tugijaamana RTK mõõtmiseks. Maa-ameti püsijaamade võrku kuuluv Toila baasjaam (joonisel 17), mille tähis on TOIL, paigaldati 22. novembril 2007. aastal.



Joonis 17. Toila püsijaama vaade ja asukoht(paremal). Allikas: Maa-ameti geodeetiliste punktide andmebaas.

Püsijaam lisati Maa-ameti geodeetiliste punktide andmekogusse riikliku põhivõrku EUREF A klassi alla ning püsijaam tähisega TOIL00EST lisati 27. aprillil 2008. aastal EUREF GNSS püsijaamade võrku (*Permanent GNSS Network – EPN*). Toila püsijaama geodeetilised ja ristkoordinaadid on välja toodud tabelis 12.

Tabel 12. Toila baasjaama koordinaadid ja kõrgus. Allikas: Maa-amet

Toila (TOIL)	X (m)	Y (m)	h (m)	B	L
	6592420.854	700686.761	76.701	59°25'19.33154"	27°32'11.86844"

Toila baasjaam koosneb Leica GR25 vastuvõtjast (lisa 5) ja LEICA AR25 R4 LEIT kaitsekupliga antennist (lisa 6) ning toetab GPS, GLONASS ja Galileo süsteeme. (EPN)

Kui võrrelda Ahtme baasjaama GNSS vastuvõtjat Trimble NetR9 ja seadet Leica GR25, siis Trimble NetR9 täpsus on alla 30 km baasjoone korral 2 mm võrra väiksem horisontaalis ja 5 mm võrra vertikaalis vastuvõtja Leica GR25 RTK mõõtmistäpsusest. Vaadates lisa 6 on näha, et Maa-ameti püsijaamade võrgu Toila baasjaamale paigutatud GNSS antenn Leica AR25 on choke ring tüüpi. Leica AR25 toetab ka Galileo signaale, kuid neid ei väljasta RTK teenus.

Antennil on olemas neljapunktiline toide faasikeskuse stabiilsuse jaoks ning väike ristlõikepindala, mis vähendab tuulekoormust. GNSS antenn ja vastuvõtja on ühendatud koaksikaabli kaudu. Samuti on antenn täiustatud madala müratasemega võimendiga (LNA – *low noise amplifier*), et vähendada suure võimsusega saatjaid. (Trimble Inc 2017)

Ahtme baasjaama vastuvõtja Trimble NetR9 tehnilised spetsifikatsioonid on kirjeldatud lisas 2. Vastuvõtjal on kaks Trimble Maxwell 6 GNSS kiibistiku 440 kanali jaoks. Vastuvõtjal on mitmefaasilise signaali tagasilükkamise tehnoloogia Trimble EVEREST, Trimble R-Track ja Trimble 360 vastuvõtja tehnoloogia. Samuti vastuvõtja väga madala müratasemega GNSS kandefaasi mõõtmiste täpsus on alla 1 mm 1 Hz ribalaiuse korral. Kui võrrelda Ahtme baasjaama vastuvõtja Trimble NetR9 mõõtmistäpsuseid ja mõõtmistöödes kasutatud Trimble R4-3 mõõtmistäpsusi, siis on näha, et mõõtmistäpsused on identsed. Nende vaheliseks erinevuseks on see, et Trimble NetR9 on tugijaama seade, mis on varustatud serveriteenusega.

1.7.2. Kiviõli baasjaam

Hadese võrgu lähim baasjaam testpunktile on Kiviõli baasjaam (joonis 19), mille tähis on KIV2. See on paigaldatud 2010. aasta lõpus. Sellel ajal Kiviõli püsijaama (tabel 13) kasutati teedeehitusel. 2011. aasta sügisel alustas Kiviõli püsijaam tööd HadNet võrgu baasjaamana.



Joonis 19. Kiviõli baasjaama vaade (vasakul) ja asukoht. Allikas: Topcon ja Maa-ameti geoportaal.

Joonisel 19 olemasolev vaade kannab illustratiivset tähendust, kuna foto ei ole tehtud täpselt Kiviõli püsijaamast, kuid pilt sarnaneb Kiviõli püsijaama antenniga.

Püsijaam koosneb Topcon G3-A1 antennist (Lisa 3) ja Topcon Legacy-E vastuvõtjast (lisa 4). Püsijaam edastab parandusandmeid formaatides RTCM 104 versioonis 2.2, CMR, CMR+. Lisas 3 on näha, et antenn toetab ainult GPS ja GLONASS süsteeme. Antenni hoiutemperatuur on kuni 85⁰C, aga töötemperatuur kuni 70⁰C. Samuti on antenn vee-ja põrutuskindel.

Kui võrrelda Kiviõli baasjaama vastuvõtjat Toila baasjaama vastuvõtjaga, siis Toila püsijaama vastuvõtja suudab jälgida GLONASS, GPS, BeiDou ja QZSS süsteeme. Topcon Legacy-E RTK täpsus horisontaalis on 10 mm + 1,5 ppm ja verikaalis 20 mm + 2 ppm. Leica GR25 täpsus horisontaalis on 10 mm + 1 ppm (rms) ja vertikaalis 20 mm + 1 ppm (rms). Seega Leica GR25 vastuvõtja on veidi täpsem kui Topcon Legacy-E.

2. MATERJALID JA METOODIKA

2.1. Välitöodes kasutatud seadmed

Seadmete valik tulenes Geomaatika õppetooli seadmetest. Parimaks GNSS seadmeks oli Trimble R4, mudel 3 ning väliarvutiks Trimble Juno T41. GNSS vastuvõtja R4 plussiks on Galileo ja Beidou signaalide toetus. Toetatud pole vaid GPS süsteemi signaal L5. Täpsused võrgu RTK meetodi korral on 8 ja 15 mm vastavalt plaaniliselt ja kõrguslikult.

GNSS vastuvõtja Trimble R4-3 (lisa 7) töötab korralikult ka kuni -40°C juures, GSM modem kuni -30°C ja akud -20°C -ga. Vastuvõtja suudab jälgida GPS, GLONASS, Galileo ja BeiDou signaale ning SBAS süsteemi. GNSS vastuvõtja elimineerib osaliselt satelliidi signaalide mitmeteelisust (Trimble Inc 2013).

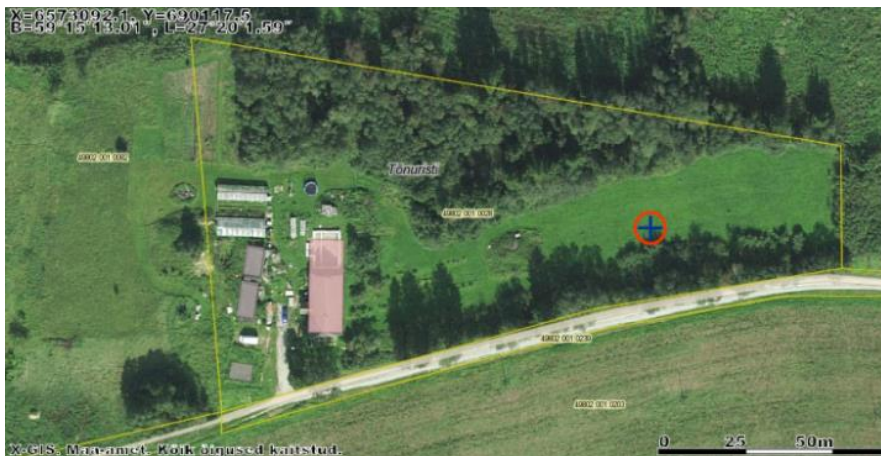
Trimble R4-3 initsialiseerimise aeg on tüüpiliselt alla 8 sekundi ning initsialiseerimine toimub automaatselt nii liikumise kui staatilise mõõtmise ajal ning selle usaldusväärsus on suurem kui 99,9%. Vastuvõtja hakkab tööle 60 sekundi jooksul pärast sisselülitamist ning 30 sekundi jooksul viimaste efemeritidega.

Katsemõõtmiste ajal kasutatud väliarvuti Trimble Juno T41 on miniarvuti, millel on Windowsi Embedded Handheld 6.5 operatsioonisüsteem (lisa 8). Väliarvutil on elektrooniline kompass, Interneti ühendus 3G abil ja talub 1,22 meetrilt maha kukkumist. Samuti on väliarvutisse installeeritud tarkvara Trimble Access versioon 2015. Väliarvuti suureks plussiks on väiksus ja kompaktsus. Eriti mugavaks teeb kasutamise sisemine 3.5G modem. Trimble Access versioon 2015 on programm, mida võib kasutada nii välitööde ajal kui veebipõhiste teenuste abil kontoris. (Trimble Inc 2015)

2.2. Geodeetilise testpunkti rajamine

Katsemõõtmiste läbiviimiseks oli rajatud ajutine geodeetiline punkt (joonis 20) rohumaale, mis asub Kalina külas, Alutaguse vallas, Ida-Virumaal. Geodeetilise punkti asukoha valimisel mängisid suurt rolli ümbruskonna avarus, maapinna vesisus ja hoonestus. Punkti

tsentriks on kasutatud metallvaia pikkusega ~40 cm ja diameetriga 10 millimeetrit ning punkti asukoha tähistamiseks on kasutatud puuoksa oranži värvi lipukesega (joonis 21).



Joonis 20. Rajatud ajutise geodeetilise punkti asukoht. Allikas: Maa-amet.



Joonis 21. Kindelpunkti tähistus. Foto: Svetlana Svežova.

Katsemõõtmiste ajal paigaldati puitstatiiv testpunktile. Puitstatiivile paigaldati treeger ja adapter ning tsentreeriti ja pandi loodi. Seejärel paigaldati GNSS vastuvõtja Trimble R4-3 treegerile ning mõõdeti mõõdupulgaga antenni kõrgus. Kõrguse tüüp oli kaldkõrgus tsentrisse (*center of bumper*), mida mõõdeti kolmest küljest ja arvutati kaldkõrguse keskmine.

2.3. RTK mõõtmiste metoodika

Avatud vaatega rohumaaale rajati testpunkt, millele oli tsentreeritud ja looditud puitstatiiv koos GNSS vastuvõtjaga Trimble R4-3. Mõõtmisandmeid salvestati väliarvutisse Trimble Juno T41.

Töö eesmärk oli analüüsida RTK mõõtmistulemuste täpsust ja stabiilsust erinevates võrgu RTK variantides. Ajutisel geodeetilisel punktil on teostatud testmõõtmised kasutades kas võrgu RTK või tava RTK mõõtmismeetodit. Parandid on saadud kas VRS võrgust, võrgu RTK, i-MAX lahendusest või lähimast baasjaamast (*nearest base station*). Mõõtmised on tehtud kolmes RTN võrgus: Trimble VRS Now, HadNet ja Maa-ameti püsijaamade võrk, kasutades erinevaid satelliitsüsteeme. Üksiku tugijaamaga RTK mõõtmistel kasutati Maa-ameti Toila baasjaama (TOIL) ning staatilise mõõtmise andmetöötluses kasutati HadNet võrgu Kiviõli baasjaama (KIV2) ning Trimble VRS Now võrgu Ahtme baasjaama (AHTM).

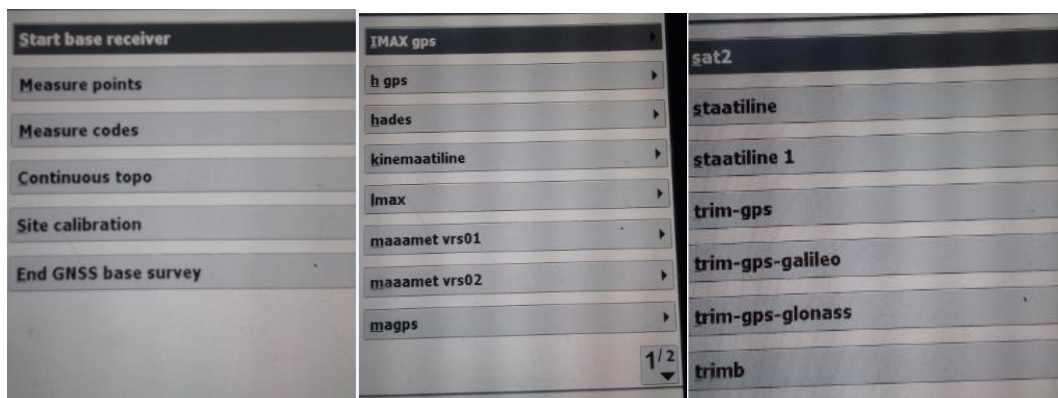
RTK mõõtmised tehti kahes GNSS süsteemide koostöö variandis: ainult GPS ja GPS-GLONASS(-Galileo). Galileo signaal oli parandusvoos kättesaadav vaid Trimble VRS Now võrgus. Üks mõõtmisseeria kestis umbes 2 tundi ja mõõteintervall oli esimese nelja andmeseeria korral 1 sekund ja ülejäänute seeriade puhul 5 sekundit. Täpsuse referentsiks on kasutatud staatilise mõõtmise tulemusi samale punktile ja erinevate RTK seeriade keskmisi.

2.4. Staatilise mõõtmise metoodika

Ajutise geodeetilise punkti alusväärtus määrati staatilise mõõtmismeetodi abil. Staatilisel mõõtmisel oli kasutatud *Fast-Static* mõõtmismeetod. Mõõtmise kestis 2 tundi ja andmed salvestusid iga 5 sekundi tagant. Kuna pärast *Fast-Static* mõõtmismeetodi valikut vajutati *Measure topopoint*, siis korraga ei saanud mõõtmise panna rohkem kui tunniks ajaks. Seetõttu on mõõtmisaeg jaotatud kaheks osaks ning iga osa kestis ühe tunni. Salvestati GPS ja GLONASS satelliitsüsteemide signaale. Järeltöötlus tehti tarkvaraga Trimble Business Center. Tugipunktidenä kasutati Trimble ja Hadese püsijaamade võrku.

2.5. Mõõtmismeetodi seadistamine väliarvutis

Enne välitööde teostamist on tehtud kaheksa erinevat mõõtmisstiili iga võrgu ja omakorda GPS või GNSS süsteemi jaoks. Mis signaale kasutatakse, saab määrata mõõtmisstiili seadete alt. Nii oli kõige lihtsam teha välikatseid valides vaid erinevaid eelkirjeldatud mõõtestiile. Mõõtmisstiil määras ära, mis satelliitsüsteemi kasutatakse. Näiteks Trimble VRS Now võrgu jaoks olid loodud profiil trimb, kus oli kaasatud kõik signaalid, ka Galileo. Lisaks on tehtud muid stiile erinevate kombinatsioonide jaoks (joonis 22).



Joonis 22. Mõõtmisstiilide loetelu väliarvutis. Autor: Margarita Svežova.

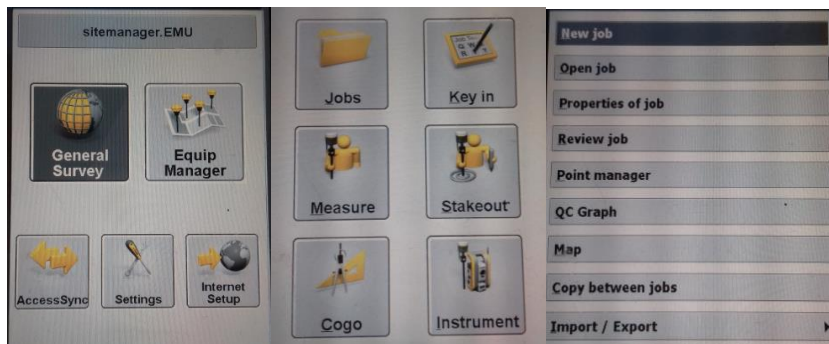
Väliarvuti programmis Trimble Access versioon 2015 saab mõõtmisstiili luua valiku *Settings*→*Survey Styles*→*New style* alt, kus saab sisestada mõõtmisstiili nime ja valida stiilitüüpi. Avanevas seadistuste loetelus on esimeseks valikuks *Rover options*.

Vastuvõtja parameetrites on oluline määrata mõõtmise meetod, kas üksiku tugijaamaga RTK, või võrgu RTK (näiteks VRS). Lisaks saab valida andmeedastusformaati, näiteks CMRx, RTCM RTK, CMR, CMR+ jne. Samuti tuleb sisestada lõikenurk, maksimaalse lubatud PDOP väärtus, antenni tüüp, antenni kõrgus, antenni kõrguse mõõtmismeetod (näiteks antenni kõrgus tsentrisse ja valida jälgitavaid signaale (näiteks GPS L1-L2, GPS L2C, GPS L5, GLONASS, Galileo, BeiDou).

Kõikides mõõtmisstiilidest on satelliidi lõikenurgaks määratud 10^0 ja antenni kõrguse mõõtmismeetodiks kõrgus antenni tsentrisse. Trimble võrgus on kasutatud korrektsoonistriimi formaati CMRx, Maa-ameti ja Hadnet võrgus on kasutatud vanemat ja suuremat formaati CMR+. Segadust võib tekitada, et alates eelmisest aastast on CMRx formaati kahesugust: ilma Galileo signaalita ja koos sellega.

2.6. RTK mõõdistuste käivitamine

Pärast GNSS vastuvõtja ja väliarvuti sisselülitamist on valitud Access peamenüüs moodul *General Surveys* ja kaust *Jobs*. Seejärel on tehtud uus töö: *Jobs*→*New job* (joonis 23). Pärast uue töö loomist pöördui tagasi *General Surveys* menüüsse ning *Measure* alt valiti sobilik mõõtmisstiil, mis oli eelnevalt loodud ja sisestati antenni keskmist kõrgust. Seejärel valiti *Continuous topo*, kus sisestati punkti järjekorranumber, salvestusintervall (1 sekund või 5 sekundit). Pärast kinnitamist (*start measure*) jäi süsteem iseseisvalt tööle, oluline oli tagada akude kestvus. Isekatkemist ei täheldatud, süsteem töötas stabiilselt. Salvestusprotsessi taustal oli heli, mis tähistas punkti salvestumist.



Joonis 23. Näide Trimble Juno T41 peamenüüdest. Autor: Margarita Svežova.

3. TULEMUSED JA ANALÜÜS

3.1. Kindelpunktile kontrollväärtuse määramine staatilise mõõtmise meetodiga

3.1.1. Mõõtmiste metoodika ja läbiviimine

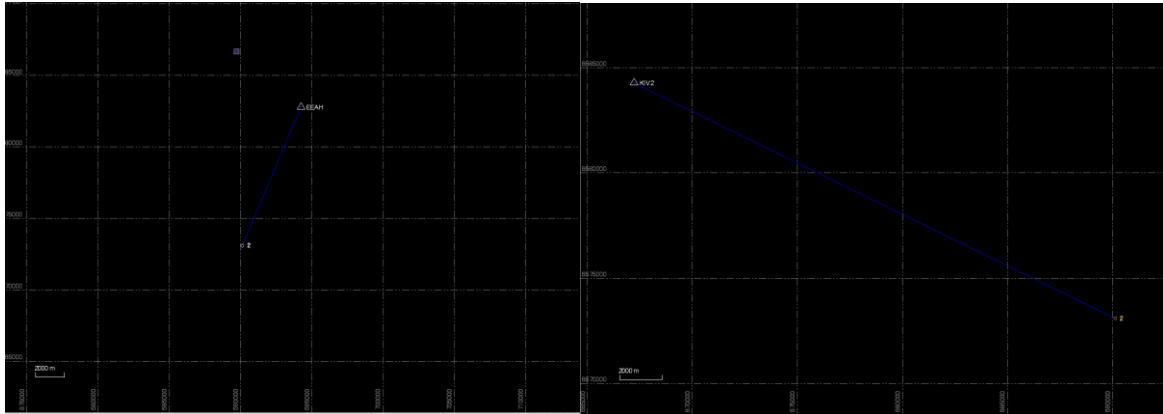
Staatiline mõõtmine sooritati 28. novembril 2017.a *Fast-Static* režiimis. Kuna väliarvuti menüüs oli valitud *Fast-Static* → *Measure topopoint*, oli staatiline mõõtmine piiratud 60 minutiga. Seetõttu on tehtud mõõtmised kahe tunniajase etapina. Esimene etapp oli ajavahemikul 11:30-12:30 ning teine etapp kell 12:32-13:32. Antenni kõrgus tsentrisse oli mõõdeti kolmest küljest, keskmine väärtus oli 1,725 m. Vastuvõtja jälgis ~16 satelliiti ja andmeid salvestati iga 5 sekundi tagant. Staatilise mõõtmise ajal oli aktiivne nii GPS, Galileo kui GLONASS. Tuule kiirus oli 5 m/s, 2°C sooja ja 5% niiskust.

Staatilise mõõtmise esialgsed töötlemata andmed erinesid RTN võrkudes mõõdetud andmetest: ~0,8 m X koordinaadis, ~1 m Y koordinaadis ja ~1,5 m kõrguses. Täpsuse parandamiseks sentimeetritasemele kasutati baasjoone arvutust (*Baseline process*) programmis Trimble Business Center (TBC).

Enne baasjoone arvutust saadeti kirjad Maa-ametile, Hades OÜ-le ja Geosoft OÜ-le, et saada samaaegseid tugijaamafaile. Andmed õnnestus saada kahe tugijaama jaoks: Trimble VRS Now võrgu jaamale Ahtme (EEAH) ja HadNet võrgu jaamale Kiviõli (KIV2). Nende põhjal on tehtud baasjoone arvutused TBC tarkvaras.

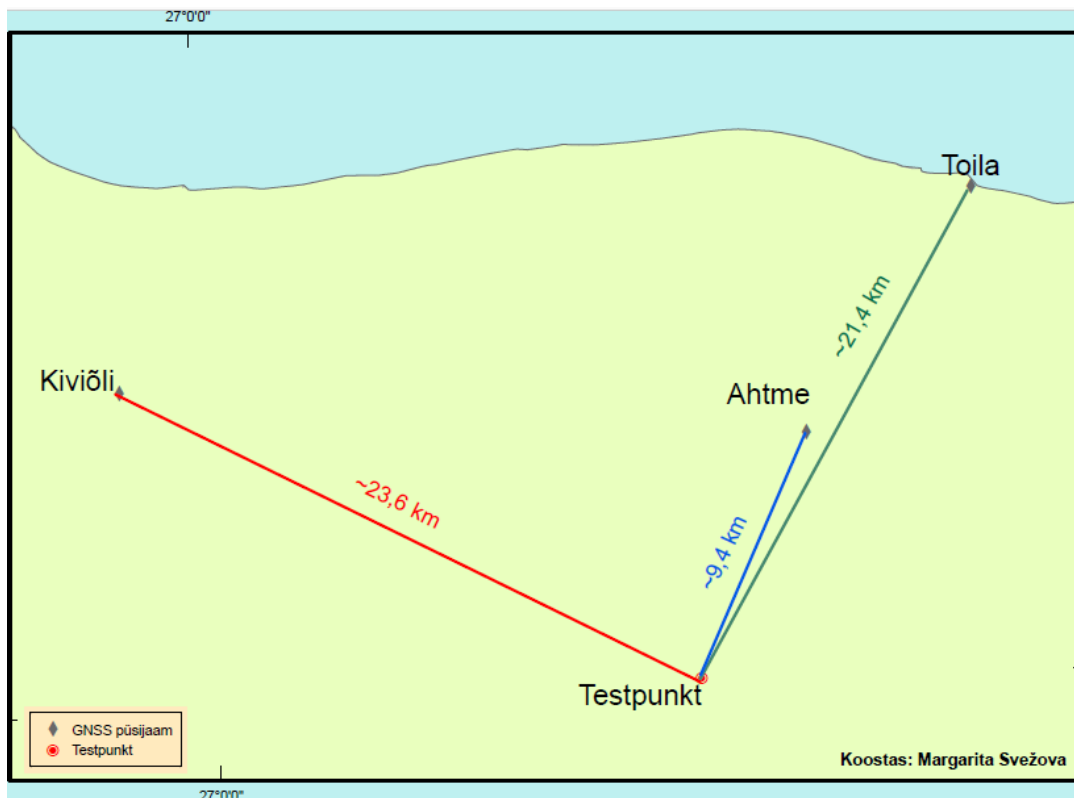
Geosoft OÜ edastas Ahtme tugijaama faili vastavalt kuupäeva ja kellaaja nõudmistele. Seega baasjoonte arvutamise protsess Ahtme baasjaama failiga (joonis 24) möödus ladusalt ja kiiresti, saadetud failis olid ka juba õiged koordinaadid fikseeritud. See selgus kontrollimise käigus Maa-ameti geodeetilisest andmebaasist. Samas Hadesse võrgu Kiviõli baasjaama failiga oli rohkem tegemist. Pidi parandama baasjaama asukoha koordinaate. Failis olid mõõdetud keskmised – mitte tegelikud väärtused. Maa-ameti geodeetilise andmekogust sai võetud Kiviõli baasjaama õiged X, Y koordinaadid ja kõrgus. Seejärel pakkisin tunniajased HadNet failid lahti eraldi kausta. Kaustas oli 33 faili, mida tuli üles

laadida programmi TBC. Lõpuks sai arvutatud baasjooned ka KIV2 tugijaama suhtes (joonis 24). Kuna minu failid olid tunniajased (2×1 h), arvutasin mõlema baasjaama suhtes tulemuse kaks korda, seega kokku neli lahendust.



Joonis 24. Trimble Business Centeris arvutatud baasjooned EEAH-1 ja EEAH-2(vasakul) ning KIV2-1 ja KIV2-2(paremal).Autor: Margarita Svežova.

Joonisel 25 on kujutatud Trimble VRS Now Kiviõli ja HadNet Ahtme baasjaamade kaugused testpunktini.



Joonis 25. Lähimate baasjaamade kaugused testpunktini.

Kiviõli tugijaam on rohkem kui poole kaugemal, samas pole 23 km kaheksa- ja üheksaastase vastuvõtja jaoks suur probleem. Kui seadme kaugusest sõltuv täpsustegur on 0,5 ppm, siis

20 km kohta võib see maksimaalselt anda vea 1 cm. Seda vähendab omakorda korduste kasutamine. Joonisel 25 on kujutatud ka Maa-ameti Toila baasjaam, millele on tehtud RTK mõõtmine. Kahjuks sellele staatilist faili ei õnnestunud saada.

3.1.2. Keskmiste väärtuste arvutamine

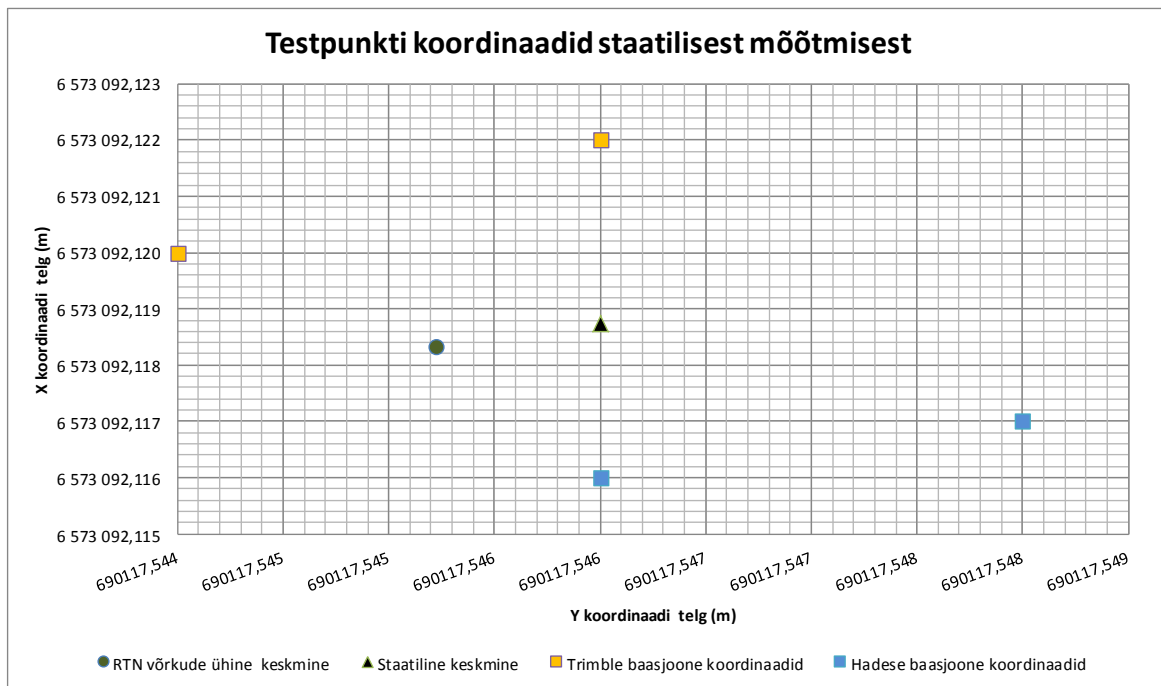
Pärast nelja baasjoone arvutust on arvutatud koordinaatide keskmised väärtused (tabel 14). Lisaks on tabelis välja toodud ka RTN võrkude keskmised. Tabelis 14 on näha, et X koordinaatide väärtused on väga sarnased, tulemuste keskmised erinevad vaid 0,4 mm. Y koordinaatide keskmised erinevad vaid 0,2 mm. Kõrguse osas on erinevus 0,7 mm. Seega kui võtta kahe jaama keskmised neljast mõõtmisest, saame usaldusväärsed tulemused. Usaldusväärsust lisab asjaolu, et tegemist oli erinevate baasjaamadega ja baasjaamade operaatoritega. Kaalusid võiks arvestada lähtuvalt baasjoone pikkusest, aga kuna erinevused on väga väikesed, pole seda tehtud.

Tabel 14. Staatilise mõõtmise esialgsed ja lõplikud koordinaadid ning RTN võrkude ühine keskmine

Baasjoon	Baasjoone pikkus (m)	TESTPUNKTI		
		X koordinaat (m)	Y koordinaat (m)	Ellipsoidi kõrgus-h (m)
EEAH-1	10518,557	6573092,120	690117,544	85,674
EEAH-2	10518,554	6573092,122	690117,546	85,669
Keskmine	10518,555	6573092,121	690117,545	85,672
KIV2-1	25476,715	6573092,116	690117,546	85,675
KIV2-2	25476,716	6573092,117	690117,548	85,655
Keskmine	25476,715	6573092,117	690117,547	85,665
Keskmiste KESKMINE		6573092,119	690117,546	85,668
Esialgsed e. töötlemata koordinaadid		6573092,916	690118,636	84,276
RTN võrkude ühine keskmine		6573092,118	690117,545	85,680

Samuti näeme tabelis 14, et staatilise mõõtmiste keskmised on sarnased RTN võrkudest saadud keskmiste väärtustega. RTN võrkude ühine keskmine erineb staatilise mõõtmise keskmiste keskmisest koordinaatides 1 mm ja kõrguses 1,2 cm.

Joonisel 26 on näha, kuidas asuvad üksteise suhtes staatilisest mõõtmisest arvutatud keskmised ja RTN võrkude suhtes saadud keskmine väärtus.



Joonis 26. Testpunkti koordinaatväärtused staatilisest ja võrgu RTK mõõtmisest (keskmine, vt allpool).

Kuna vahed on väiksed, pole eriti vahet, mis väärtus võtta testpunkti õigeks väärtuseks: kas väärtus staatilisest mõõtmisest või RTK mõõtmiste keskmine. Arvestades seda, et me uurime RTK seeriade hajuvust, ei oma 1 mm suurune erinevus tähtsust. Enamasti muutuvad RTK mõõtmistes väärtused sentimeetrites. Kuna staatilise mõõtmise tulemused on saadud neljast tunniajasest seeriast, on võetud aluseks staatilise mõõtmise tulemused.

3.1.3. Staatilise arvutuse analüüs

Analüüsides TBC-s välja võetuid satelliitide raporteid (lisa 9-12), on näha, et baasjoonel uus punkt-EEAH jälgiti ajavahemikul 11:30-12:30 jälgitud kahekümne ühe satelliidi L1/L2 signaalid (lisa 9). Nendest üksteist satelliiti kuulub GPS süsteemile ja kümme satelliiti GLONASS-ile. Raportis on näha, et vastuvõtja on jälginud pidevalt ja katkematult ühe tunni jooksul 12 satelliidi signaale, ülejäänud edastasid signaale katkendlikult. Kõige kehvemini edastasid signaale satelliidid G12, R9 ja R15.

Lisas 10 on välja toodud sama baasjoone satelliidid, mis olid kättesaadavad kell 12:32-13:32. Sellel ajal töötas katkematult 6 GPS ja 5 GLONASS süsteemi satelliiti. Kõige halvemini saatsid vastuvõtjale signaale R9, G32, G9, G12, G11 ja G25. Veel võib märgata,

et mõlema baasjoone korral töötasid halvasti G12 ja R9 satelliidid ning R15 ei olnud kättesaadav teise tunniajalise staatilise mõõtmise korral.

Kui uurida Kiviõli baasjaamaga arvutatud baasjooni, siis esimese baasjoone korral (lisa 11) on näha, et kasutusel on 14 satelliiti, millest 9 olid GPS satelliidid ja 5 GLONASS satelliidid. Katkestused signaalides olid satelliitidelt G12, R9 ja R15.

Lisa 12 kajastab Kiviõli baasjaamaga arvutatud teist baasjoont. Vastuvõtja jälgis pidevalt ja takistamatult 13 satelliidi signaale ning mõningate häiretega jälgis 10 satelliidi signaale, millest 4 satelliiti (G6, G9, R9 ja G11) edastasid signaale kõige vähem.

Kahe baasjoone võrdlemisel, hakkab silma ühine satelliit R9, mis ei saanud hakkama signaalide pideva edastamisega. Samuti G12 töötas natuke paremini teise tunni jooksul võrreldes esimese mõõtmistunniga. Tähelepanuväärne on see, et R9 ei töötanud hästi kummagi baasjaama korral ning R15 oli kättesaadav ainult kell 11:30-12:30. Seda põhjustas ilmselt satelliidi madal tõusunurk ja takistused. Enamik satelliite ei olnud siiski takistustest mõjutatud.

3.2. RTK testmõõtmiste kirjeldus ja analüüs

3.2.1. Tööde teostamise ajagraafik ja parameetrid

Välitööd teostati 21. kuni 28. novembril 2017. Mõõtmiste ajal oli antenni kõrgus ligikaudu 1,70 meetrit, et vältida satelliitide takistusi. Mõõtmisi tehti päeva esimesel poolel ning enam-vähem samal kellaajal, et oleks võimalikult samad tingimused.

Tabel 15 annab ülevaate RTK testide ajagraafikust ja valitud signaalidest. Samuti on näha kasutatud tugijaama variant. Ainult GPS süsteemi kasutamise korral jälgis vastuvõtja ligikaudu ~9-10 satelliiti. Kõige rohkem satelliite (kuni ~30) jälgis vastuvõtja GPS, GLONASS ja Galileo süsteemide kooskasutamisel. GNSS seadme kanalite arv ei olnud probleemiks ka siin, kuna L5 signaali ei kasutatud. Siiski on 54 kanali kasutamine tähelepanuväärne.

Tabel 15. RTK mõõtmiste ajagraafiku koondtabel

RTN võrk või üksik tugijaam	GNSS süsteemid	Kuupäev 2017.a	Kellaaeg	Antenni kõrgus GPS alla (m)	Satelliidi maksima alne arv
Trimble VRS Now	GPS	21.11	11:09-13:12	1.714	~9-11
	GPS+GLONASS+Galileo		13:19-15:17		~30
HadNet	GPS	22.11	11:07-12:57	1.748	~9-11
	GPS+GLONASS		13:20-15:12		~19
Maa-ameti võrk VRS	GPS	23.11	11:15-13:12	1.727	~9-11
	GPS+GLONASS		13:20-15:20		~19-24
Toila baasjaam	GPS	24.11	12:12-13:42	1.740	~9-11
Maa-ameti võrk i- MAX	GPS	27.11	11:20-13:20	1.734	~9-11
	GPS+GLONASS		13:30-15:30		~20
Staatiline mõõtmine	GPS+GLONASS	28.11	11:30-12:30 12:32-13:32	1.725	~16

*Trimble R4-3 poolt jälgitavate satelliitide arv on ligikaudne.

3.2.2. RTK mõõtmiste esialgne töötlus

Kogutud mõõtefailidest on andmed eksporditud tekstifaili. Selleks on kasutatud Trimble eelseadistatud profiili „*GPS points*“. Väljundfailis on näha ka satelliitide arv, PDOP ja rms väärtused iga punkti jaoks. Lisaks on tehtud ka täisväljavõte „*Survey raport*“, kus on veelgi detailsemad tulemused. Täisväljavõte on tehtud siiski vaid vajadusel, kuna maht läheb sadadesse lehekülgedesse juba ühe mõõteseeria korral.

Kogutud mõõtmisandmete töötlemiseks, struktureerimiseks ja illustreerimiseks kasutati programmi Microsoft Excel. Programmis sorteeriti mõõtmisandmeid seeriade põhiselt ja koostati diagrammid. Iga mõõteseeria on paigutatud eraldi Excel lehele.

Erinevate diagrammide jaoks tuli andmeid ümber sorteerida, näiteks maksimaalse erinevuse saamiseks. Kokkuvõtlikult on MS Excel programmis loodi kaks põhilist faili; ühes failis on 12 töölehte, milles on RTN võrkude andmeseeriade histogrammid ja tabelid, ning teises failis on 10 töölehte, milles on mõõtmisandmete struktureeritud tabelid. Mõlemad kaustad ja „*Survey raport*“-id on salvestatud lisadena CD kettale.

3.3. Testmõõtmised ja tulemused Trimble VRS Now võrgu abil

Trimble VRS Now võrgu abil sooritati mõõtmisi 21 novembril 2017.a. Antenni kõrgus tsentrisse oli 1,714 m ning andmeid salvestati iga sekundi tagant. Mõõtmiste ajal oli temperatuur 0°C juures, tuulekiirus 1m/s, 100% niiskus ja esines udu. Mõõtmised, kus kasutati ainult GPS signaale tehti kell 11:09-13:12. Sellel ajal oli kättesaadav ~9-10 satelliiti. Mõõtmised, kus kasutati kombinatsiooni GPS+Glonass+Galileo, tehti kell 13:19-15:17 ning kuni ~27 satelliiti olid kättesaadavad.

Seega kestsid mõõtmistööd Trimble VRS Now võrgus 4 tundi. Esimeses kahe tunni pikkuses andmeseerias on kasutatud ainult GPS süsteemi, mille tulemusena salvestus 7409 punkti. Umbes sama pikkusega andmeseerias, kus kasutati GPS, GLONASS ja Galileo signaale, salvestus 6666 punkti.

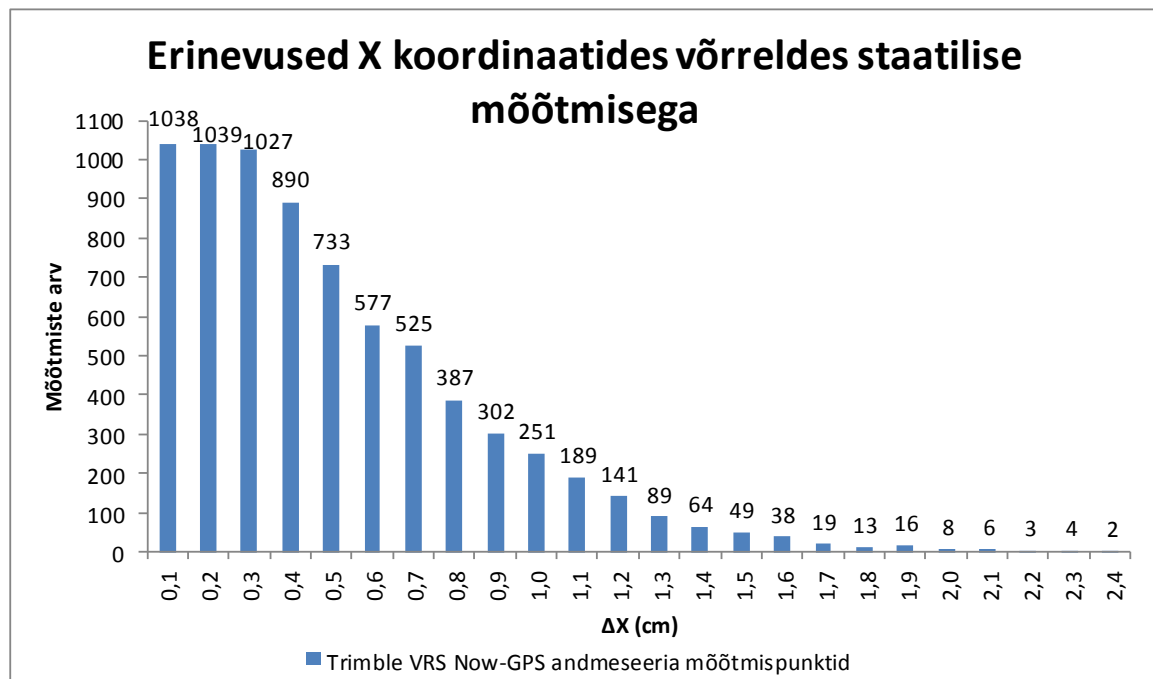
3.3.1. Ainult GPS signaalide põhine mõõtmine

Mõõtmistulemustest on arvatatud keskmised väärtused. Tabel 16 on toodud testpunktile mõõdetud keskmine väärtus ning võrdluseks staatilise mõõtmise keskmine ja standardhälbed. Tabelis 16 on näha, et GPS seeria keskmine erineb staatilisest mõõtmisest X koordinaadis 2 mm, Y koordinaadis 2 mm ja kõrguses 3 mm.

Tabel 16. Trimble VRS Now GPS andmeseeria ja staatilise mõõtmise keskmine (m) ning standardhälbed (mm)

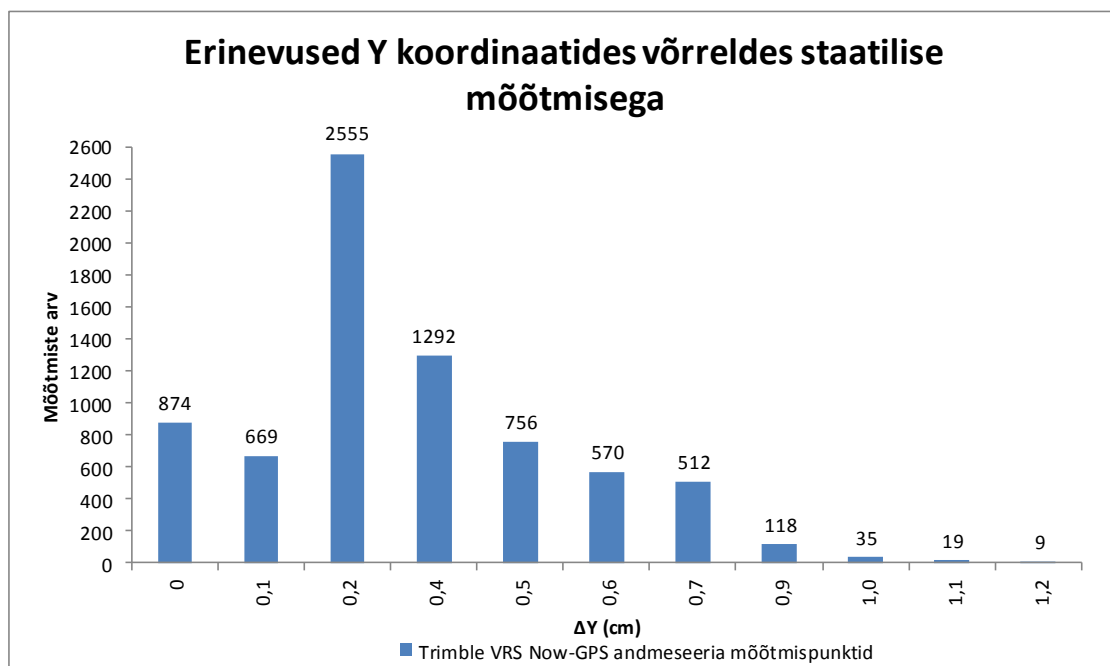
GNSS süsteem	X	Y	h	Std X	Std Y	Std h
GPS	6573092,117	690117,548	85,671	5,719	2,887	10,050
Staatiline mõõtmine	6573092,119	690117,546	85,668	2,754	1,633	9,215

Joonis 27 näitab, et maksimaalseks erinevuseks staatilisest mõõtmisest on X koordinaadil ~2,4 cm ja 869 punktil on erinevus suurem kui 1 cm (k.a. 1 cm). Seega üle 1 cm veaga punkte on umbes 12% ja üle 2 cm veaga punkte on vaid 23.



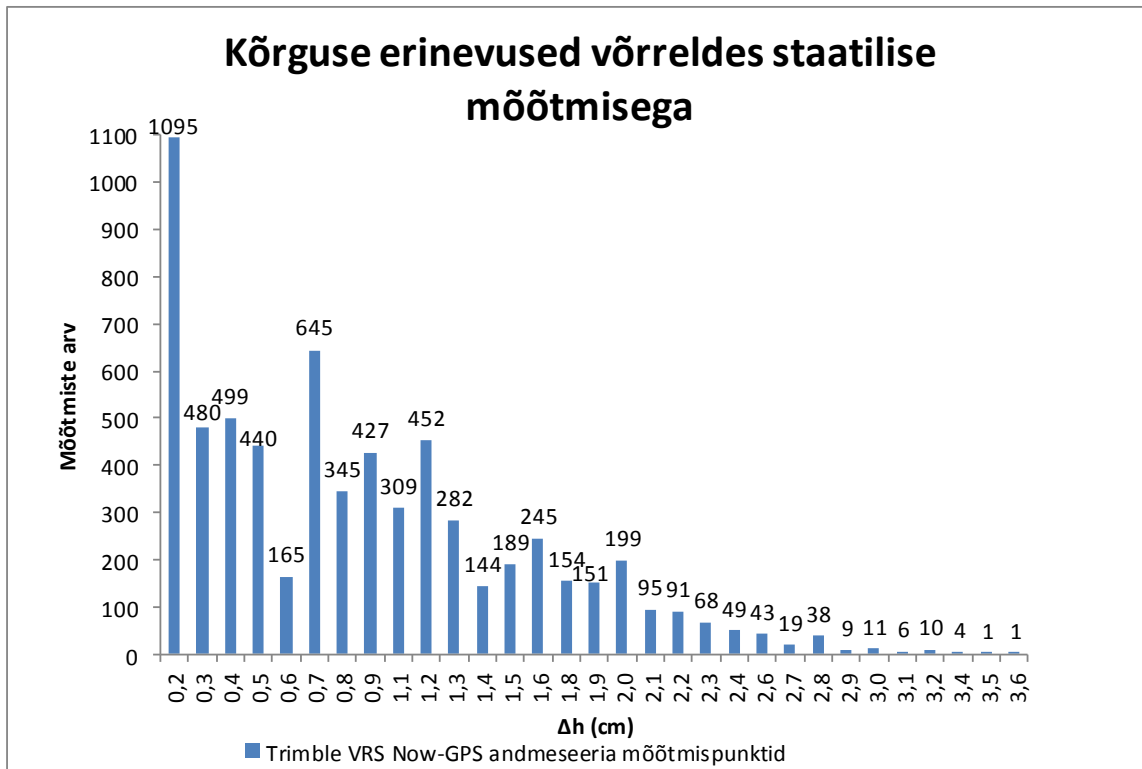
Joonis 27. Erinevused X koordinaatides võrreldes staatilise mõõtmisega. Trimble VRS Now ainult GPS signaalid.

Y koordinaadi osas tuli kõige suurem erinevus vaid 1,2 cm. Enamus punkte on väiksema veaga kui 1 cm (joonis 28) ja ainult 63 punkti on suurema veaga kui 1 cm (k.a. 1 cm).



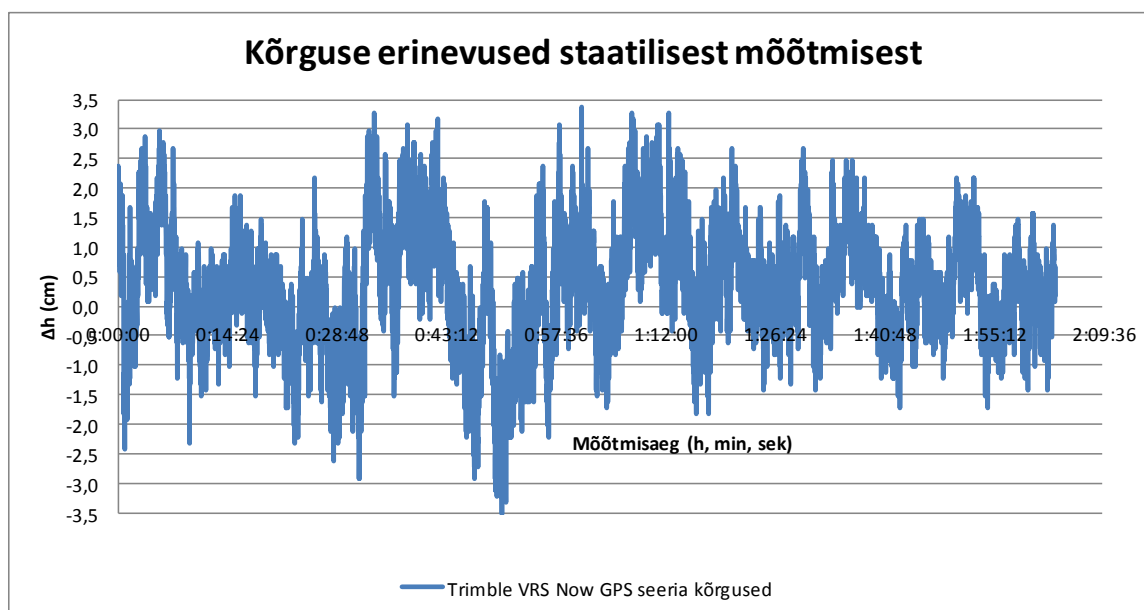
Joonis 28. Erinevused Y koordinaatides võrreldes staatilise mõõtmisega. Trimble VRS Now ainult GPS signaalid.

Kõrguse erinevused on maksimaalselt 3,6 cm. Üle 2 cm (k.a. 2 cm) suuruse veaga punkte on 644, seega alla 10% (joonis 29). Üle 3 cm erinevusega punkte on 22. Seega juhuslik viga 3 cm pole välistatud.



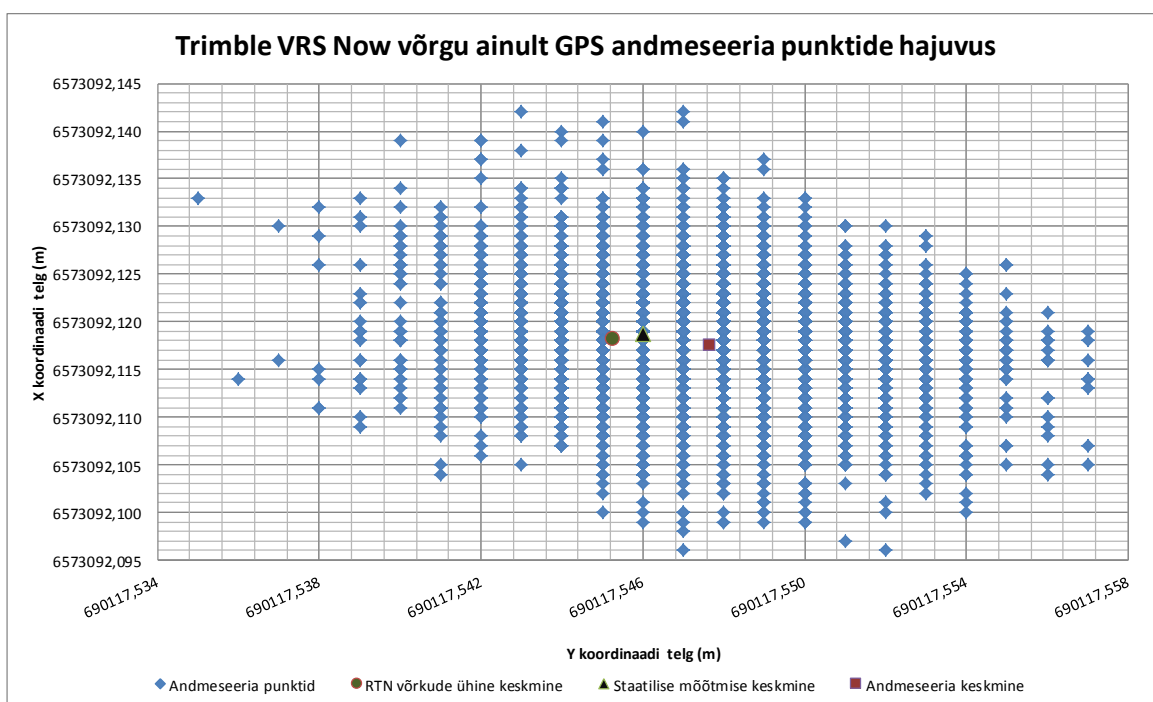
Joonis 29. Kõrguse erinevused võrreldes staatilise mõõtmisega. Trimble VRS Now ainult GPS signaalid.

Joonisel 30 on kujutatud GPS seeria kõrguse erinevused ka ajaliselt. Joonisel 30 on näha, et maksimaalne kõrguse erinevus on 3,5 cm ja minimaalne -3,5 cm. Maksimaalne erinevus 3,5 cm esineb 43 ja 57 minuti vahel ning -3,5 cm 57 minuti ja 1 tund 12 minuti vahel. Graafikus on selgelt näha mingi laine, mida on raske seletada. Siiski saab öelda, et vigade esinemine on pidevas muutuses, mingit kindlat vigade „auku“ ei esine. See on hea näitaja, kinnitades, et mõõdetetk pole nii oluline.



Joonis 30. Kõrguse erinevused staatilisest mõõtmisest. Trimble VRS Now ainult GPS signaalid.

Joonisel 31 on kujutatud mõõtmispunktide asukoht ja selle hajuvus keskmise suhtes. Suurem osa punktidest paiknevad veerudena ühe millimeetrilise vahega, kuid on olemas üksikud punktid, mis asuvad teistest kaugemal.



Joonis 31. Trimble VRS Now võrgu ainult GPS andmeseeria vigade jaotus.

Lähtudes testpunkti alusväärtusest (tähis-must kolmnurk), siis GPS andmeseeria mõõtmispunktid paiknevad staatilise mõõtmise suhtes võrdselt. Seega X ja Y koordinaadi erinevused jaotuvad keskmiste suhtes ühtlaselt, mis näitab, et süstemaatilist viga pole.

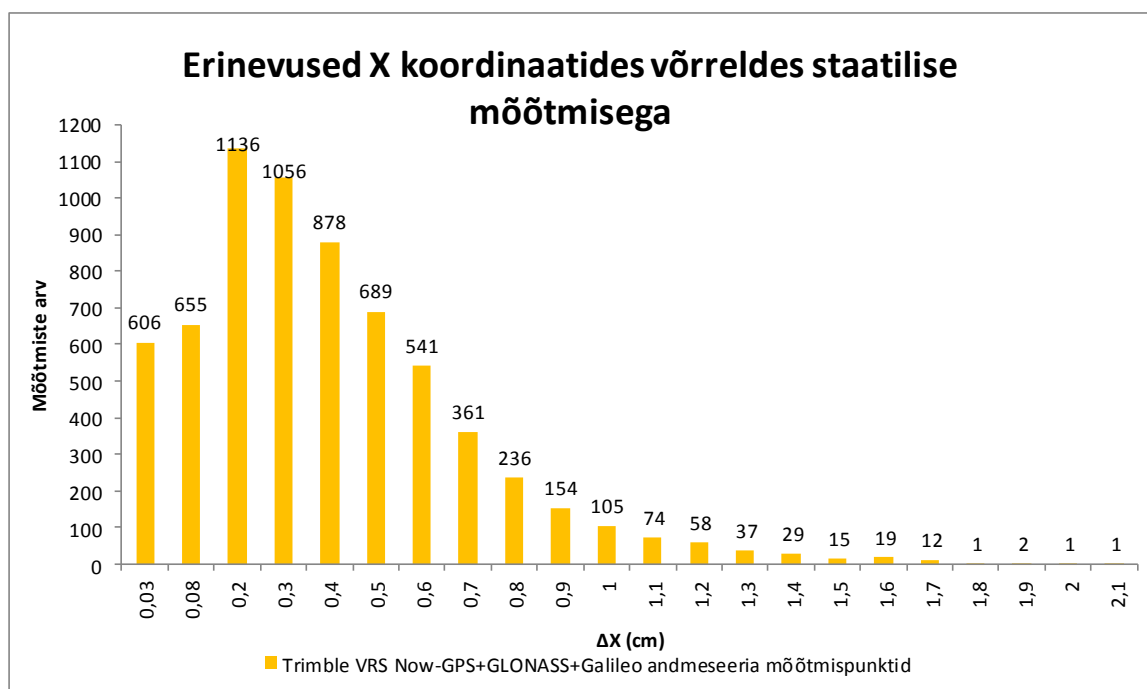
3.3.2. GPS, GLONASS ja Galileo signaalide põhine mõõtmine

MS Exceli abil on arvutatud keskmised väärtused ja veahinnangud. Tabelis 17 on välja toodud testpunkti mõõdetud andmeseeria keskmine väärtus, võrdluseks staatilise mõõtmise keskmine ning nende standardhälbed. Tulemuse keskmine erineb staatilisest mõõtmisest X koordinaadis 0 mm, Y koordinaadis 1 mm ja kõrguses 12 mm. Lisaks on huvitav jälgida ka tulemusi ainult GPS meetodi kasutamise suhtes, eriti just standardhälvet. Võrreldes tabelit 17 ja tabelit 16 näeme, et GLONASS ja Galileo signaalide lisamine on standardhälvet isegi pisut vähendanud. Seega ainult GPS kasutamine siin eelist ei andnud.

Tabel 17. Trimble VRS Now GPS, GLONASS, Galileo andmeseeria ja staatilise mõõtmise keskmine (m) ning standardhälbed (mm)

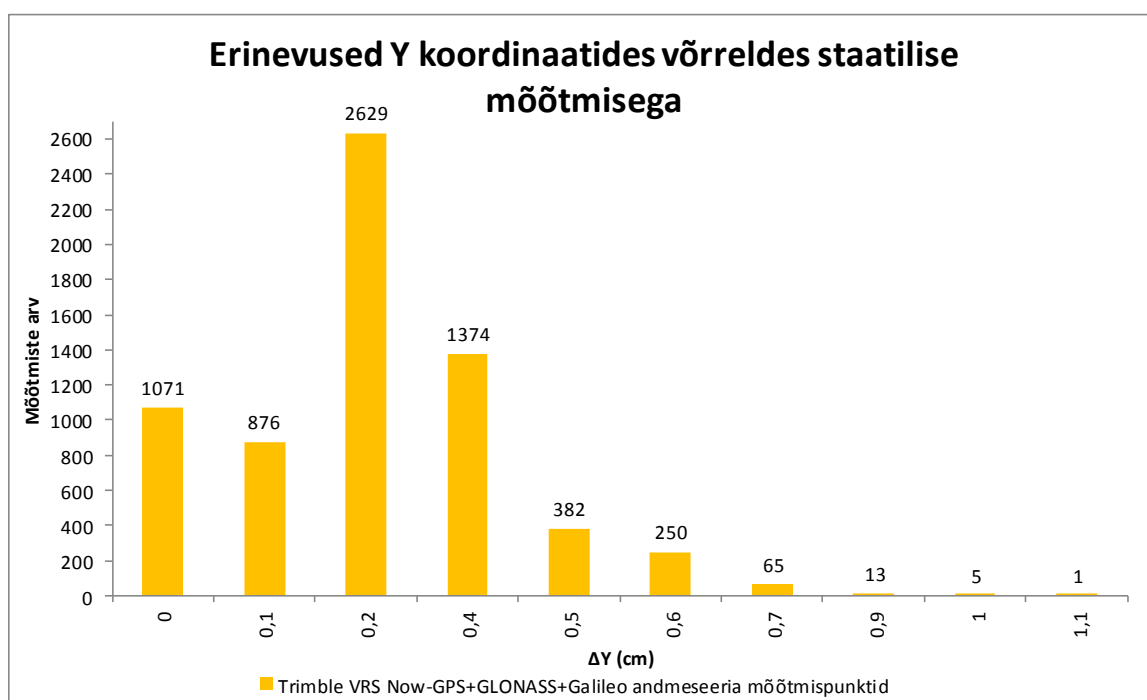
GNSS süsteem	X	Y	h	Std X	Std Y	Std h
GPS+GLONASS+Galileo	6573092,119	690117,547	85,680	4,545	2,357	9,881
Staatiline mõõtmine	6573092,119	690117,546	85,668	2,754	1,633	9,215

Joonisel 32 on näha, et X koordinaadis on 2192 mõõtmispunktil erinevused 0,2 – 0,3 cm piires. Üle 1 cm (k.a. 1 cm) suurusi vigu on 354 punktil. Kui võrrelda eespool toodud GPS andmeseeriaga, siis seal oli üle 1 cm suurusi vigu 892 punktil. Seega lisasignaali kasutamine on nende vigade arvu vähendanud ligikaudu poole võrra.



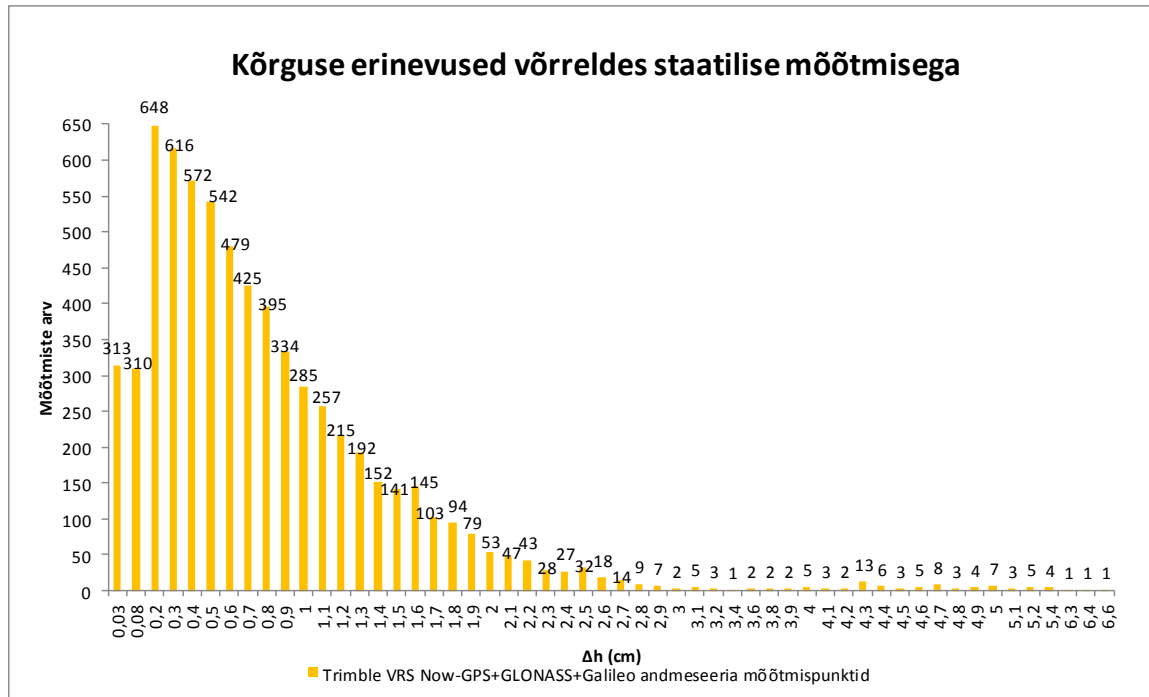
Joonis 32. Erinevused X koordinaatides võrreldes staatilise mõõtmisega. Trimble VRS Now GPS, GLONASS, Galileo signaalid.

Vaadates Y koordinaadi erinevusi, on näha, et üle 1 cm vigu on siin vaid kuuel punktil. Ainult GPS signaalidega mõõtes oli neid 63 punkti. Seega selliste mõõtmispunktide arv on siin drastiliselt vähenenud (joonis 33).



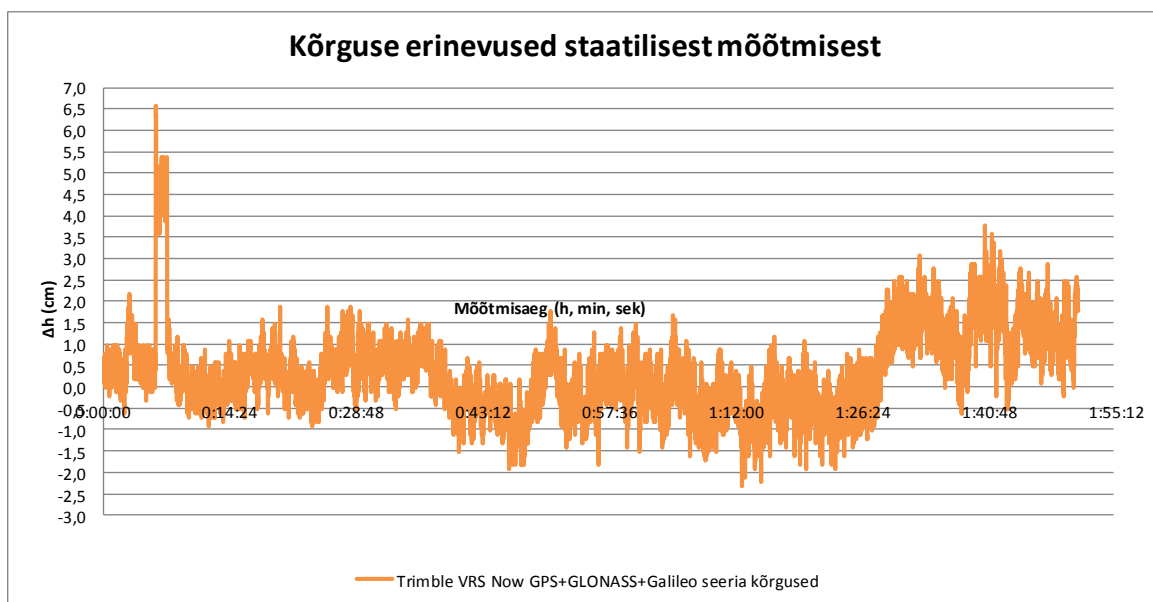
Joonis 33. Erinevused Y koordinaatides võrreldes staatilise mõõtmisega. Trimble VRS Now GPS, GLONASS, Galileo signaalid.

Kõrguste maksimaalne erinevus on 6,6 cm (joonis 34). Üle 2 cm (k.a. 2 cm) suuruse veaga punkte on 278, aga ainult GPS seerias on neid 611. Siiski on mitukümmend punkti suurema veaga kui 4 cm. Sellise veaga punktid puudusid täielikult ainult GPS signaalidega mõõtes. Seega suurte juhuslike vigadega punktide arv on selgelt kasvanud.



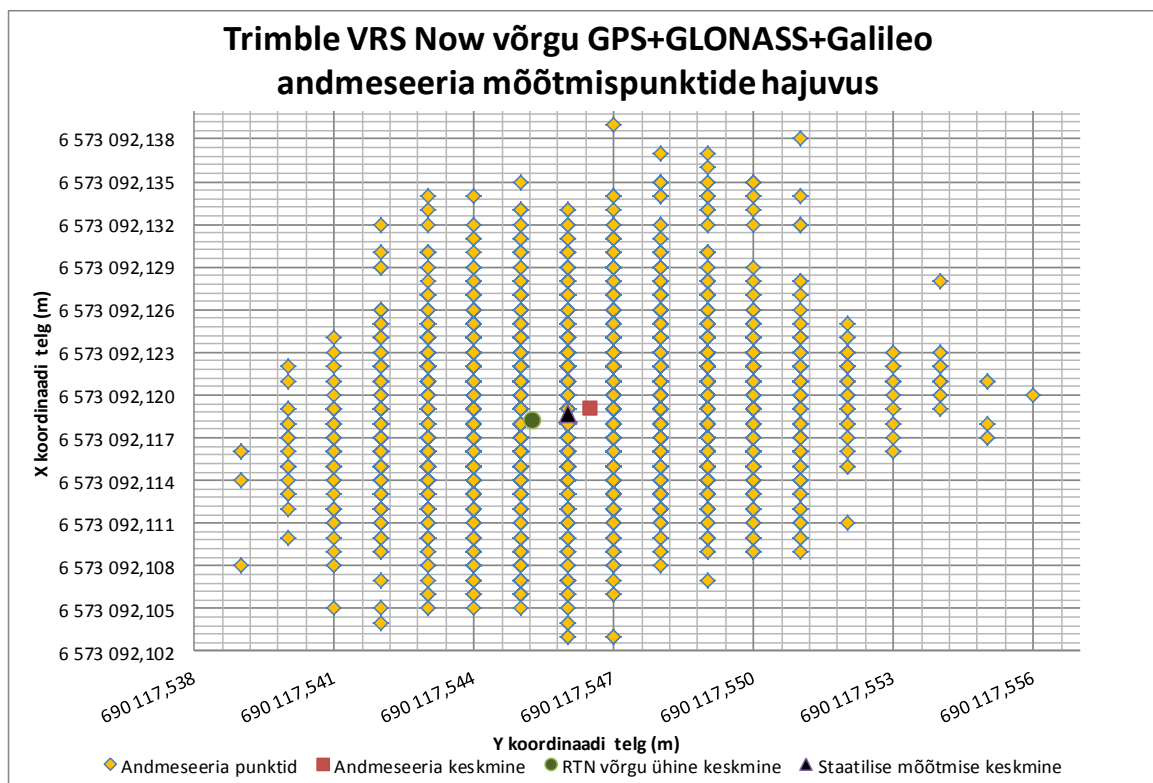
Joonis 34. Kõrguse erinevused võrreldes staatilise mõõtmisega. Trimble VRS Now GPS, GLONASS, Galileo signaalid.

Trimble VRS Now GPS+GLONASS+Galileo seeria kõrguse erinevuste graafik (joonis 35) on küll ühtlasem kui ainult GPS signaalide korral, kui esineb suurte vigade selge periood 6-7 minutil. Kõrgus suureneb punktil 360 äkitselt 6 cm, siis väheneb 3 punkti pärast 1-2 cm ja jääb sinna tasemele. Suurem vähenemine tagasi toimub alles punktil 438. Seega üle 1 minuti püsib kõrgus u 4-6 cm kõrgem keskmisest. Selle põhjust on raske hinnata. Punktil 359 on baasjaama andmete vanus 3 sekundit (vt lisa 13). Tavaliselt on see 1 sekund. Punktil 360 on vanus jälle 1 sekund. Seega on andmesides mingi katkestus ja punkt 359 on parandatud 3 sekundit vanade andmetega. Samas värskemate andmete tulek tekitab hüppe. Satelliitide arv on 29 mõlemal juhul. Alles punktil 372 tõuseb satelliitide arv 30-le. Ka tagasihüppe juures ei muutu satelliitide arv, vaid püsib 31 peal. Seega on seda "ärakäiku" ikkagi raske seletada. Mainida võiks, et isegi satelliitide suur arv ei väldi seda sorti hüpet. VRS baasjaama asukoha X koordinaat on 6573093.4 m, Y koordinaat on 690118.3 m ning kõrgus on 85,151m (B=59°15'13,05421", L=27°20'01,63922").



Joonis 35. Kõrguse erinevused staatilisest mõõtmisest. Trimble VRS Now GPS+GLONASS+Galileo signaalid.

Trimble võrgu GPS+GLONASS+Galileo andmeseeria (joonis 36) mõõtmispunktide hajuvus on veidi ühtlasem kui GPS andmeseeria oma (joonis 31).



Joonis 36. Trimble VRS Now võrgu GPS+GLONASS+Galileo andmeseeria vigade jaotus.

Vaadates staatilise mõõtmise keskmise (tähis-must kolmnurk) asukohta, siis andmeseeria mõõtmispunktid asuvad keskmise suhtes ühtlaselt ning süstemaatilist viga ei paista.

3.3.3. Kahe mõõteseeria omavaheline võrdlus – GPS versus GPS-GLONASS-Galileo

Trimble VRS Now võrgu ainult GPS andmeseeria kindelpunkti keskmine X koordinaat erineb GPS+GLONASS+Galileo andmeseeria testpunkti keskmisest X koordinaadist vaid 2 mm, Y koordinaadist 1 mm ja ellipsoidi kõrguses erineb 9 mm (tabel 18).

Tabel 18. Trimble VRS Now võrgu ainult GPS ning GPS+GLONASS+Galileo andmeseeriade keskmised (m) ja standardhälbed (mm)

GNSS süsteem	X	Y	h	Std X	Std Y	Std h
GPS	6573092,117	690117,548	85,671	5,719	2,887	10,050
GPS+GLONASS+Galileo	6573092,119	690117,547	85,680	4,545	2,357	9,881
Staatiline mõõtmine	6573092,119	690117,546	85,668	2,754	1,633	9,215

Samuti on tabelis 18 näha, et GPS seeria ja GPS+GLONASS+Galileo seeria X koordinaadi standardhälbed erinevad 1,17 mm, Y koordinaadi standardhälbed 0,53 mm ja kõrguse standardhälbed 0,17 mm. Seega standardhälvete erinevused on väga väikesed, ega anna võimalust üht meetodit teisele eelistada. Kõige suurem erinevus on kõrguse osas. Absoluutarvus on erinevus 9 mm (tabel 18), vaid GPS signaalidega saadud tulemus on staatilise mõõtmisega saadud tulemusele lähedasem, erinedes vaid 3 mm. Koos GLONASS ja Galileo signaalidega saadud tulemus erineb staatilisest mõõtmisest 1,2 cm. Ka on näha selge tendents, et GLONASS ja Galileo signaalidega saadud mõõtmises on kõrguse osas suuremaid juhuslikke vigu oluliselt rohkem. Üle 3 cm (k.a. 3 cm) suuruse veaga punkte on siin 91 ja ainult GPS signaalidega saadud tulemuses vaid 33 ehk peaaegu 3 korda vähem. Seega peab tõdema, et vaid GPS signaalide abil tehtud kõrguse mõõtmised on juhuslike vigade osas vähem tundlikud ja tulemus oli ka täpsem. Samas peab ütlema, et suured vead esinesid lühikese aja jooksul.

3.4. Testmõõtmised ja tulemused HadNet võrgu abil

HadNet võrgu abil sooritati mõõtmisi 22 novembril 2017.a. Antenni kaldkõrgus tsentrisse oli 1,748 m ja andmesalvestus toimus ühe sekundi tagant. Mõõtmiste ajal oli temperatuur -1⁰C, tuulekiirus 1m/s, 100% niiskus ja udune. Mõõtmisi, kus kasutati ainult GPS signaale tehti kell 11:07-12:57. Sellel ajal jälgiti ~9-10 satelliiti. Mõõtmisi, kus kasutati GPS+GLONASS signaale, tehti kell 13:20-15:12 ja kättesaadavad olid ~19 satelliiti. Ühe

tunni ja viiekümne minuti jooksul oli mõõdetud 6512 punkti GPS andmeseerias ning ühe tunni ja viiekümne kahe minuti jooksul salvestus GPS+GLONASS andmeseerias 6790 punkti. Kahe andmeseeria mõõtmisandmed erinevad 278 mõõtmispunkti võrra. Galileo signaale HadNet võrgustriimis polnud.

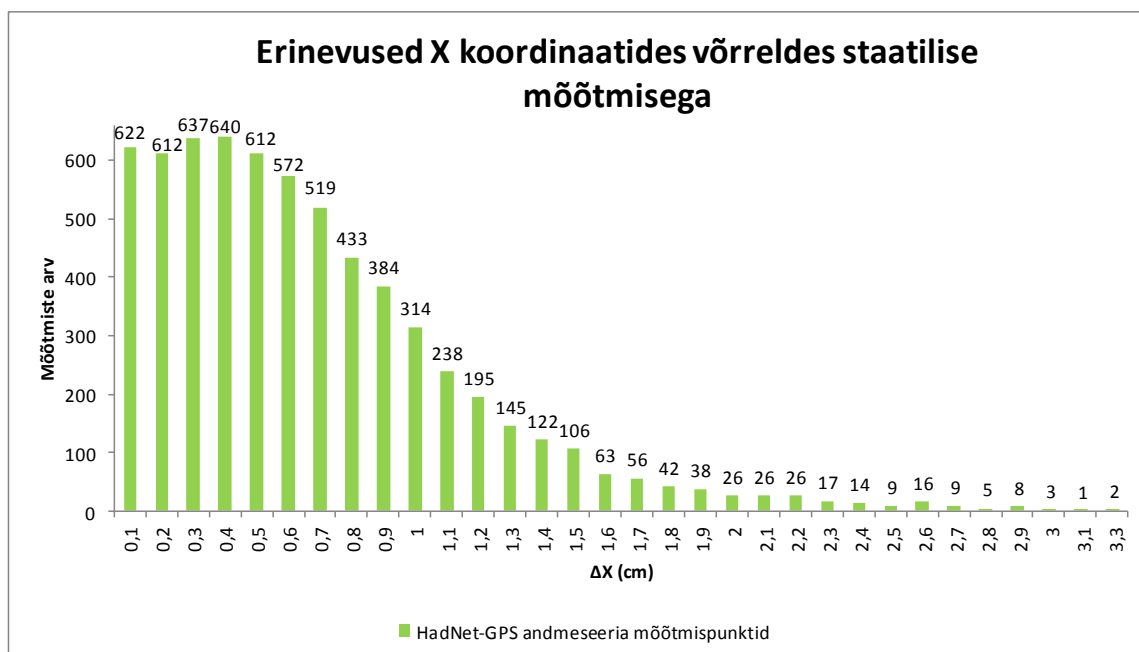
3.4.1. Ainult GPS signaalide põhine mõõtmine

Tabelis 19 on toodud võrdluseks ka staatilise mõõtmise keskmine väärtus koos standardhälvetega. GPS seeria keskmine erineb testpunkti alusväärtusest X koordinaadis 2 mm, Y koordinaadis 4 mm ja kõrguses 23 mm.

Tabel 19. HadNet võrgu ainult GPS andmeseeria ja staatilise mõõtmise keskmine (m) ning nende standardhälbed (mm)

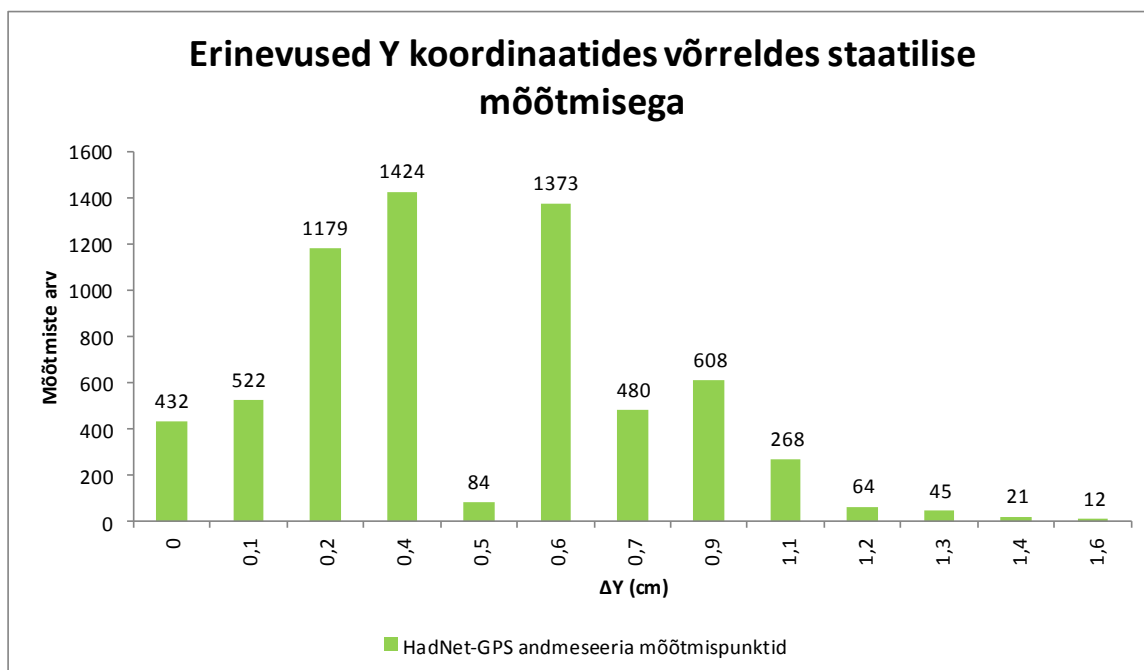
GNSS süsteem	X	Y	h	Std X	Std Y	Std h
GPS	6573092,121	690117,542	85,691	7,589	3,736	12,883
Staatiline mõõtmine	6573092,119	690117,546	85,668	2,754	1,633	9,215

GPS andmeseeria maksimaalne erinevus staatilise mõõtmise keskmisest X koordinaadis on ~3,3 cm, Y koordinaadis on 1,6 cm ja kõrguses on ~6,8 cm. Üle 1 cm (k.a. 1 cm) suuruse veaga punkte on X koordinaadis 1319 ning üle 2 cm (k.a. 2 cm) suurune viga on 162 punktil (joonis 37).



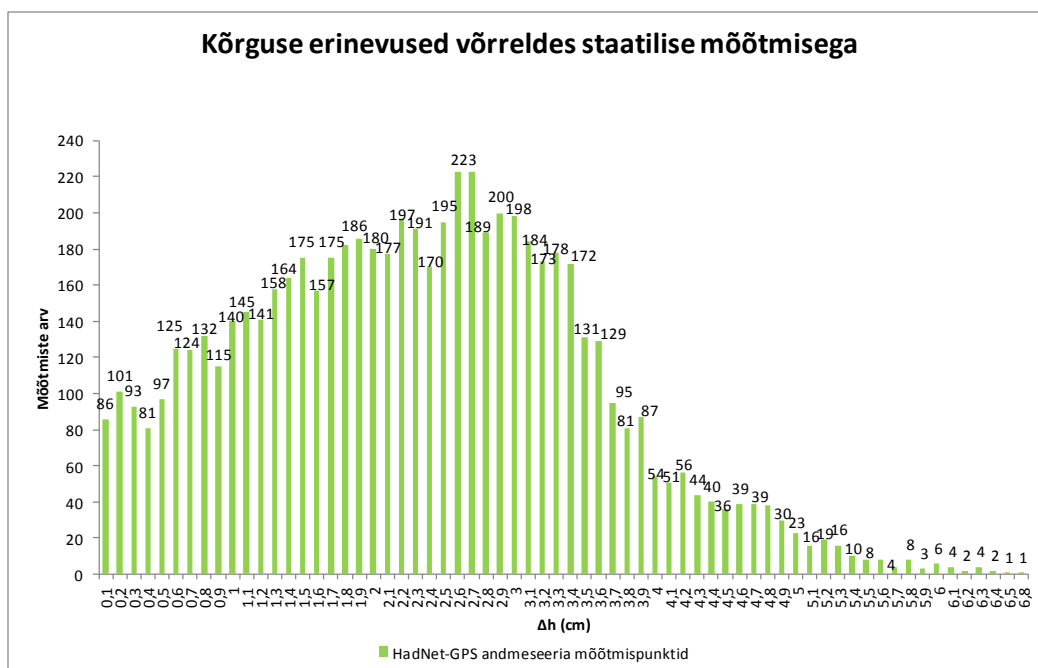
Joonis 37. Erinevused X koordinaatides võrreldes staatilise mõõtmisega. HadNet võrgu ainult GPS signaalid.

Y koordinaadi osas on üle 1 cm (k.a. 1 cm) suuruse veaga punkte 410 ja Trimble VRS Now võrgu GPS seerial oli neid vaid 63 (joonis 38).



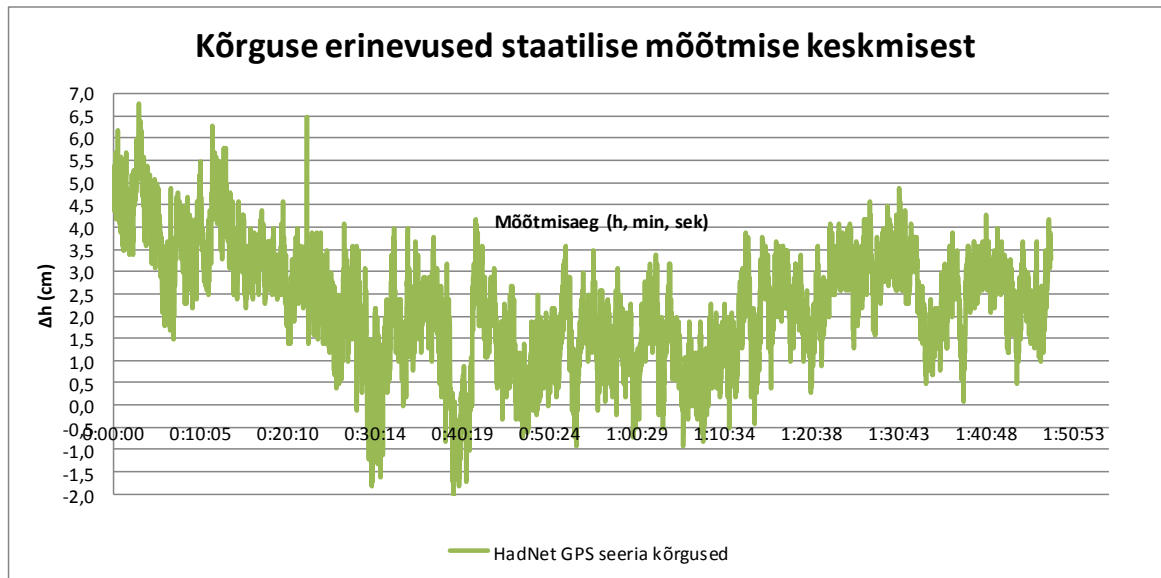
Joonis 38. Erinevused Y koordinaatides võrreldes staatilise mõõtmise keskmisega. HadNet võrgu ainult GPS signaalid.

Kõrguse osas on üle 2 cm (k.a. 2 cm) suurune viga 1945 punktil. Üle 3 cm (k.a. 3 cm) suuruse veaga on 1990 mõõtmispunkti (joonis 39). Ka üle 5 cm suurusi punkte on mõnikümmend ning Trimble VRS Now's need puudusid.



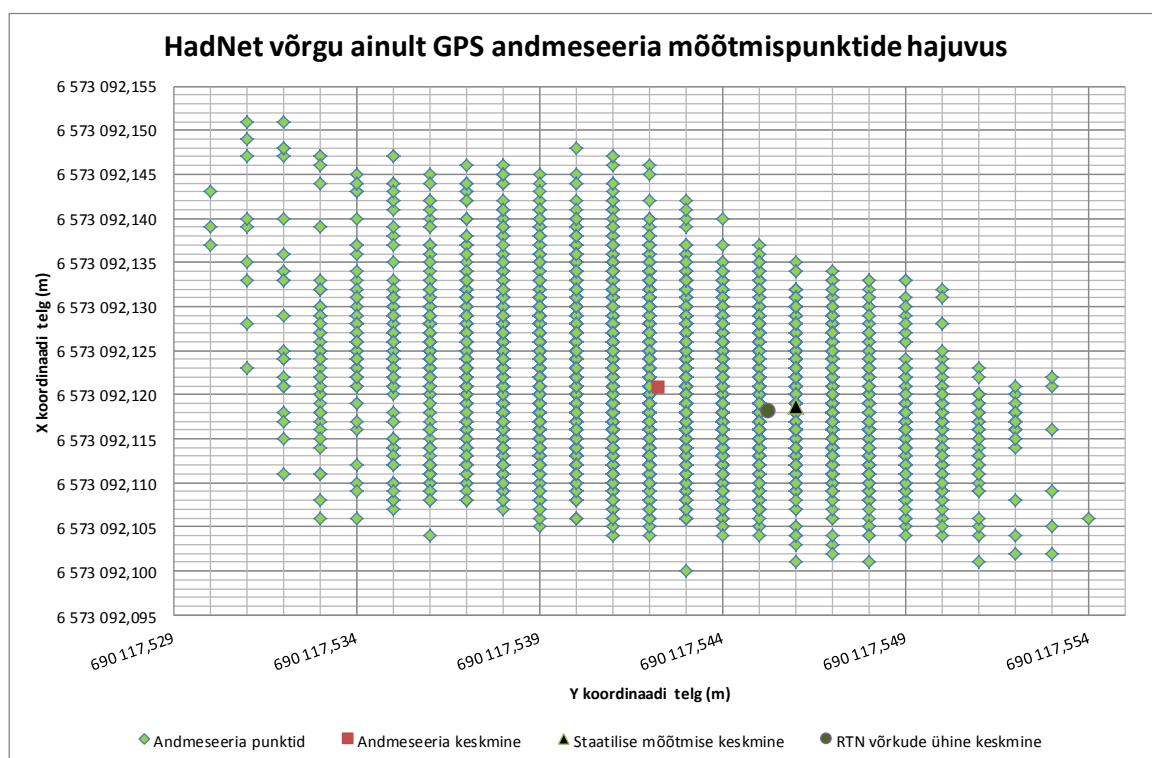
Joonis 39. Kõrguse erinevused võrreldes staatilise mõõtmisega. HadNet võrgu ainult GPS signaalid.

HadNet võrgu GPS seeria kõrguse erinevused vastavalt mõõtmisajale on kujutatud joonisel 40. Graafikul on näha, et esimese poole tunni kõrgused erinesid staatilisest mõõtmisest kuni -6,7 cm. Enamus suuri erinevusi ongi päris mõõtmise alguses. Lisaks on süstemaatiline nihe umbes 2 cm. Kui see kõrvaldada, lähevad tulemused palju õigemaks. Seega probleem ei paista olevat parandite modelleerimises, vaid võib oletada baasjaamade kõrguste viga.



Joonis 40. Kõrguse erinevused staatilisest mõõtmisest. HadNet võrgu ainult GPS signaalid.

Joonisel 41 on näidatud HadNet GPS seeria 6512 mõõtmispunkti ja staatilise mõõtmise keskmise paigutus.



Joonis 41. HadNet võrgu ainult GPS andmeseeria vigade jaotus.

Lähtudes staatilise mõõtmise keskmisest on näha, et suurem osa RTN mõõtmispunktidest paiknevad vasakul. See näitab selgelt süstemaatilise vea olemasolu ka Y koordinaadis (~ 5 mm), aga veidi ka X koordinaadis (~2 mm). Jällegi võib oletada tugijaamade koordinaatide probleemi.

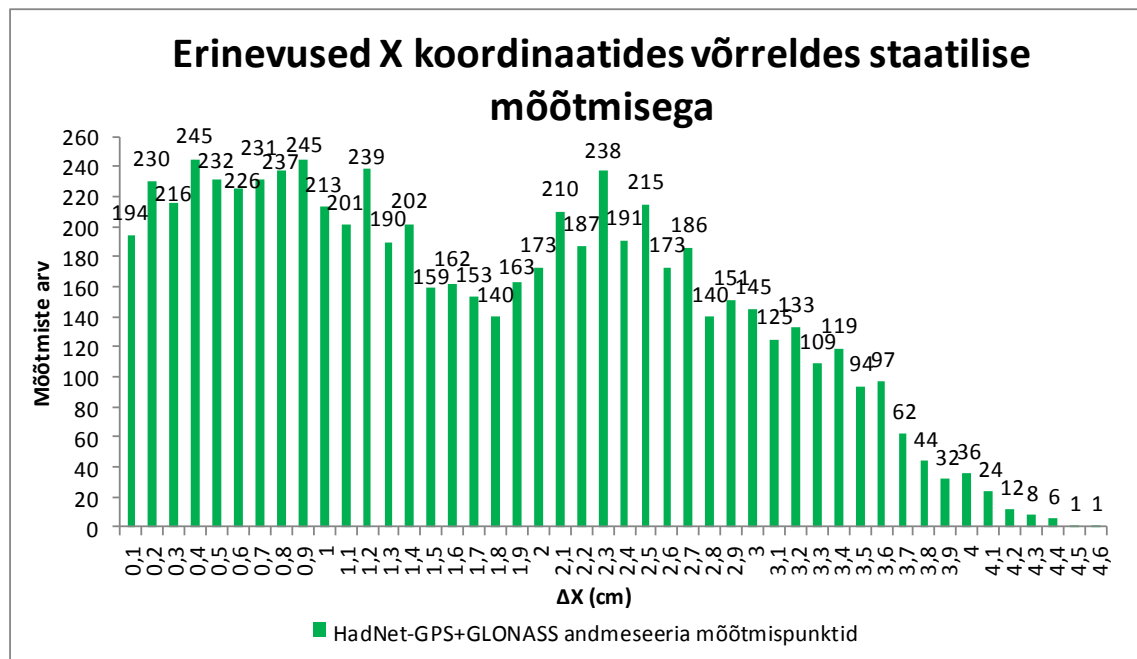
3.4.2. GPS+GLONASS signaalide põhine mõõtmine

GPS+GLONASS seeria keskmine erineb testpunkti alusväärtusest X koordinaadis 2 mm, Y koordinaadis 8 mm ja kõrguses 15 mm (tabel 20).

Tabel 20. HadNet võrgu GPS, GLONASS andmeseeria ja staatilise mõõtmise keskmine (m) ning standardhälbed (mm)

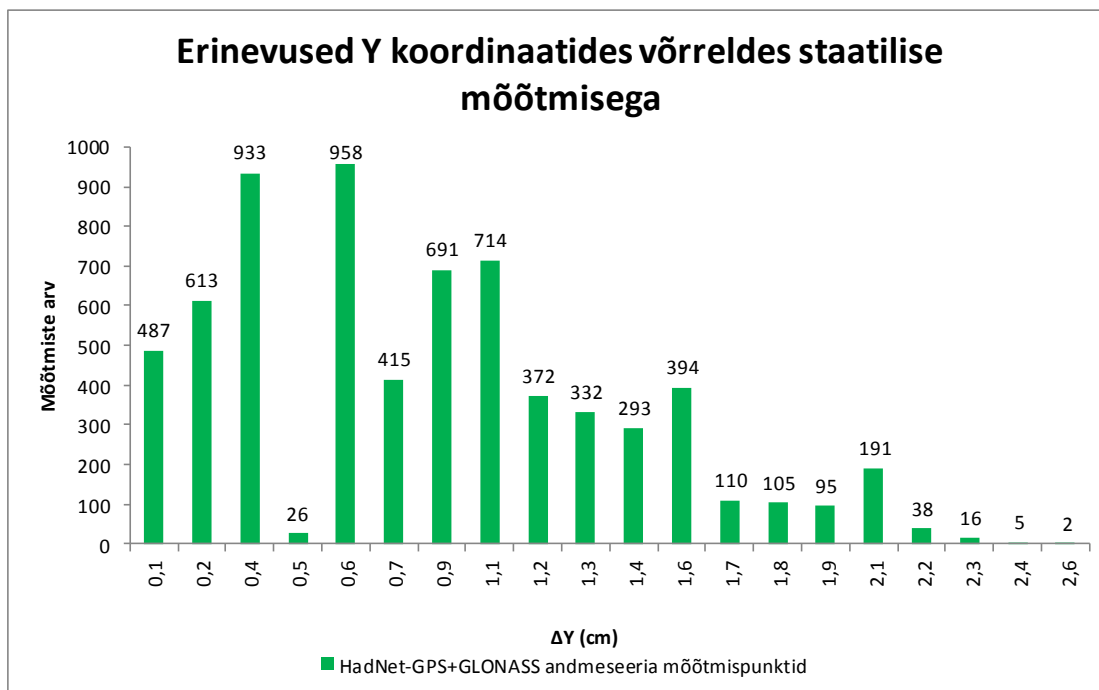
GNSS süsteem	X	Y	h	Std X	Std Y	Std h
GPS+GLONASS	6573092,121	690117,538	85,683	19,692	5,835	16,682
Staatiline mõõtmine	6573092,119	690117,546	85,668	2,754	1,633	9,215

Suurimad erinevused staatilisest mõõtmisest on X koordinaadis ~4,6 cm, Y koordinaadis 2,5 cm ja kõrguses ~5,4 cm. X koordinaadi erinevuste tulpdiaagramm (joonis 42) on palju ühtlasem, kui üksnes GPS andmeseeria tulpdiaagramm.



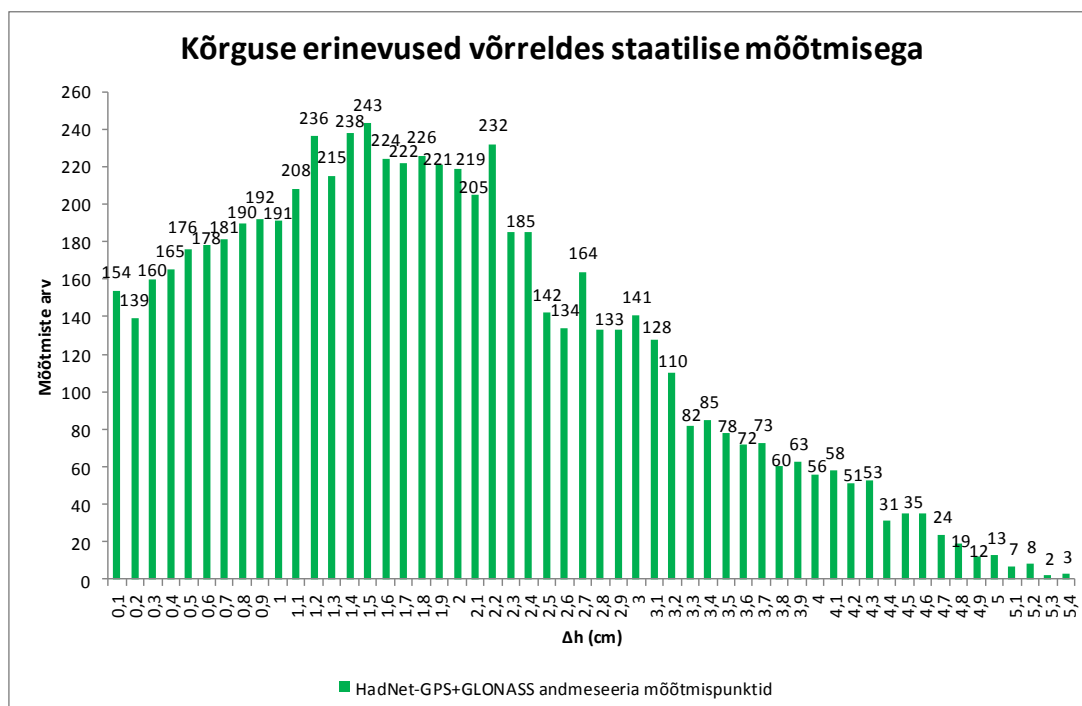
Joonis 42. Erinevused X koordinaatides võrreldes staatilise mõõtmisega. HadNet GPS+GLONASS signaalid.

Y koordinaatide erinevuste tulpdiaagrammil (joonis 43) on ebaühtlasem paigutus ning suurimaks veaks on 2,6 cm. Antud graafik sarnaneb GPS andmeseeria graafikuga (joonis 38), kuna kõige rohkem mõõtmispunkte paikneb 0,4 cm ja 0,6 cm juures. Vaadates graafikut võib märgata, et üle 1 cm suurusi vigu on 2415 punktil ja üle 2 cm suurusi vigu on 252 mõõtmispunktil. Kui võrrelda vaid GPS seeria graafikuga, siis seal üle 1 cm suurusi vigu oli 410 punktil ning üle 2 cm suurusi vigu polnud. Seega ainult GPS signaalide kasutamine andis juhuslike vigade osas parema tulemuse kui GPS+GLONASS signaalide kasutuse korral.



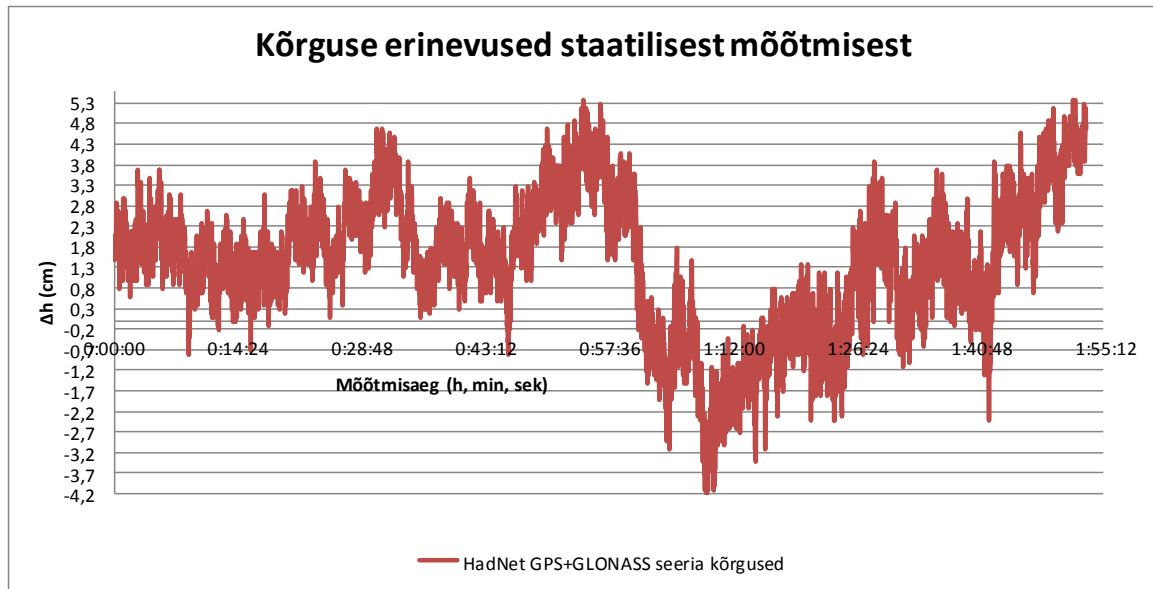
Joonis 43. Erinevused Y koordinaatides võrreldes staatilise mõõtmisega. HadNet GPS+GLONASS signaalid.

Võrreldes HadNet võrgu ainult GPS (joonis 39) ja GPS+GLONASS (joonis 44) seeria kõrguse erinevuste diagramme, siis nad on sarnased. Üle 2 cm (k.a. 2 cm) suurusi vigu on 1732 punktil ning üle 3 cm (k.a. 3 cm) suuruse veaga on 892 mõõtmispunkti. 407 punktil on üle 4 cm (k.a. 4 cm) suurune viga.



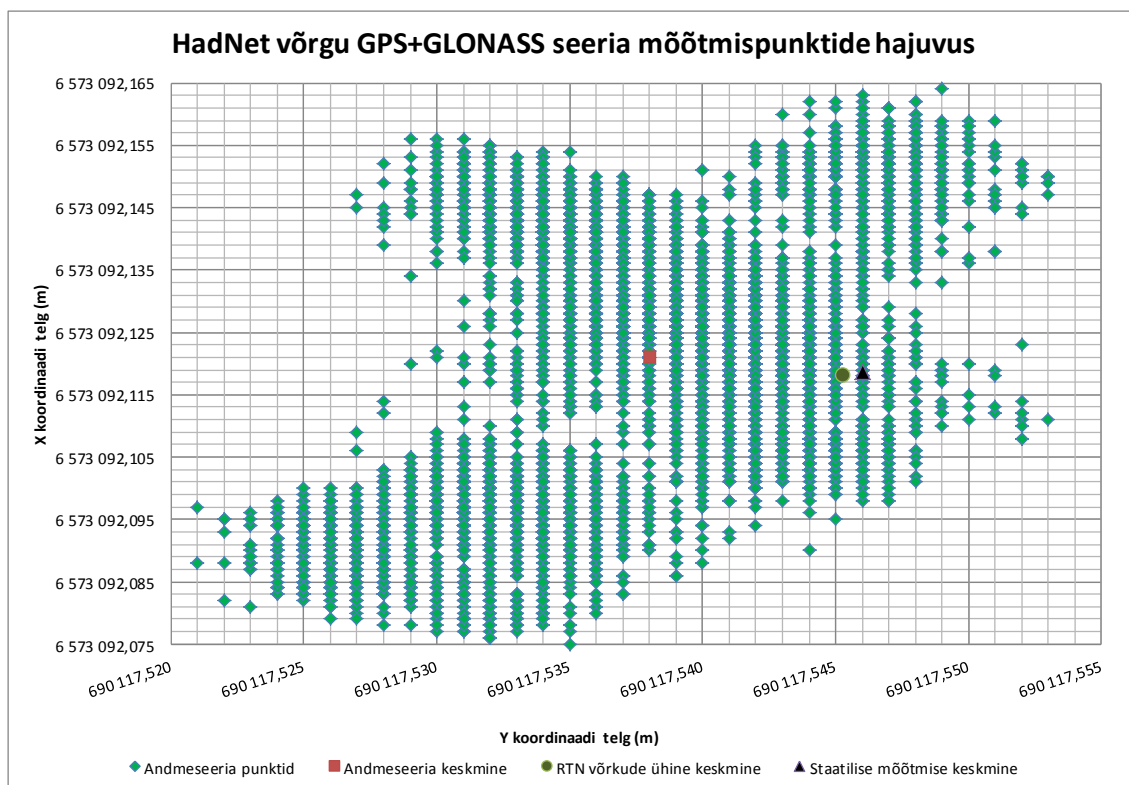
Joonis 44. Kõrguse erinevused võrreldes staatilise mõõtmisega. HadNet GPS+GLONASS signaalid.

Kui võrrelda erinevusi kõrgustes vaid GPS andmeseeriaga, siis on suure veaga punkte vähem. Põhjuseks on suure süstemaatilise vea puudumine (joonis 45), kuigi umbes 1 cm on ka siin. Sarnaselt GPS andmeseeriaga esineb tulemustes poole tunnine laine, mis teise tunni sees on võimendunud.



Joonis 45. Kõrguse erinevused staatilisest mõõtmisest. HadNet GPS+GLONASS signaalid.

Joonisel 45 on näha, et minimaalne kõrguse erinevus on -5,2 cm ja maksimaalne 4,3 cm. Samuti on süstemaatiline viga 1,4 cm. HadNet võrgu GPS+GLONASS seeria kõrgused on suuremad staatilisest mõõtmisest esimese mõõtmistunni ajal ning suuremad teise mõõtmistunni ajal ja viimase poole tunni jooksul.



Joonis 46. HadNet võrgu GPS+GLONASS andmeseeria vigade jaotus.

Võrreldes omavahel GPS (joonis 41) ja GPS+GLONASS (joonis 46) andmeseeriade mõõtmispunktide hajuvuse graafikuid, siis mõlemal asub suurem osa mõõtmispunktidest vasakul pool alusväärtusest (tähis-must kolmnurk), mis tähendab, et Y koordinaadis on süstemaatiline viga GLONASS süsteemi kaasamisel lausa 9 mm.

3.4.3. Kahe mõõteseeria omavaheline võrdlus – GPS versus GPS-GLONASS

HadNet võrgu GPS ja GPS+GLONASS (tabel 21) andmeseeria keskmised erinevad X koordinaadis 0 mm, Y koordinaadis 4 mm ja kõrguses 8 mm, seega on keskmiste erinevused väikesed. Rohkem erinevad standardhälbed, mis on GLONASS süsteemi kaasamisega läinud oluliselt halvemaks: X koordinaadis 12 mm, Y koordinaadis 2 mm ja kõrguses 3,7 mm võrra. Tabel 21 on näha, et GPS seeria standardhälbed on selgelt väiksemad kui GPS+GLONASS andmeseeria omad. Seega on GLONASS süsteemi kaasamisel suuremate juhuslike vigade tõenäosus suurem.

Tabel 21. HadNet võrgu ainult GPS ja GPS+GLONASS andmeseeriade keskmised (m) ja standardhälbed (mm)

GNSS süsteem	X	Y	h	Std X	Std Y	Std h
GPS	6573092,121	690117,542	85,691	7,589	3,736	12,883
GPS+GLONASS	6573092,121	690117,538	85,683	19,692	5,835	16,682
Staatiline mõõtmine	6573092,119	690117,546	85,668	2,754	1,633	9,215

Keskmised tulemused on üsna head, aga GLONASS süsteemi kaasamine suurendas oluliselt juhuslikke vigu. Samuti on näha, et Y koordinaadis on süstemaatiline viga ja GLONASS süsteem vaid suurendas seda. Kui vaadata kõrguse täpsust, siis GPS+GLONASS andmeseeriast tuli täpsem keskmine (erinevus 15 mm mitte 26 mm) ja süstemaatiline viga on väiksem (1,4 cm).

3.5. Testmõõtmised ja tulemused Maa-ameti RTN võrgu VRS teenuse abil

Maa-ameti võrgus on sooritatud mõõtmised 23 novembril 2017.a. Antenni kõrgus oli 1,727 m, andmesalvestus toimus iga 5 sekundi tagant. Mõõtmised Maa-ameti võrgu VRS teenuse abil, kus kasutati ainult GPS signaale, toimusid kell 11:15-13:12. Sellel ajal oli kättesaadav kuni ~10 satelliiti. Mõõtmiste ajal oli temperatuur -1⁰C, tuulekiirus 6 m/s ja 18% niiskus. Mõõtmisi, kus kasutati ainult GPS+GLONASS, tehti kell 13:20-15:20. Sellel ajal olid jälgitud umbes ~19-24 satelliiti. Ilm oli -2⁰C, tuulekiirus 6 m/s, 72% niiskus ja sadas lund. Ühe tunni ja viiekümne seitsme minuti jooksul on salvestatud 1400 punkti ainult GPS andmeseerias ning kahe tunniga on salvestatud 1401 mõõtmispunkti GPS+GLONASS andmeseerias.

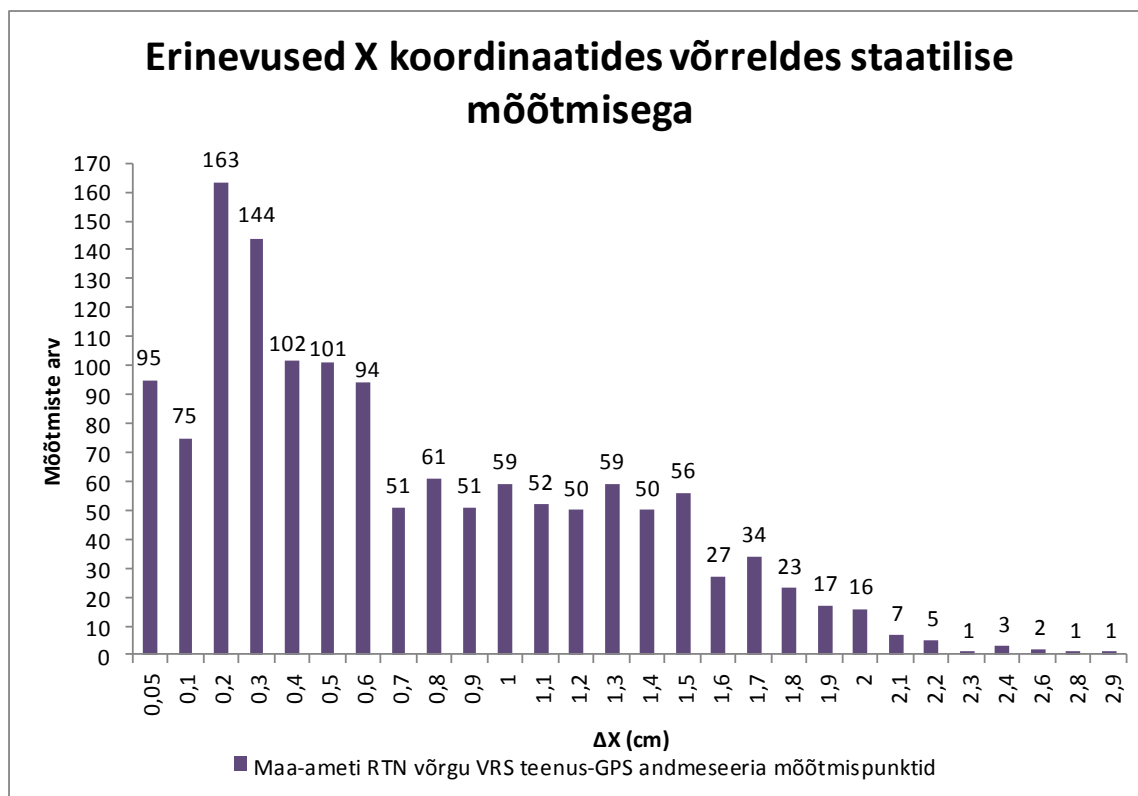
3.5.1. Ainult GPS signaalide põhine mõõtmine

Lähimad Maa-ameti tugijaamad olid Narva-Jõesuu (NJOE), Toila (TOIL), Alajõe (AJOE) ja Mustvee (MVEE). Maa-ameti võrgu VRS teenuse abil tehtud mõõtmistulemustest on arvutatud keskmine ja selle standardhälbed. Tabelis 22 on võrdluseks lisatud staatilise mõõtmise tulemus ning on näha, et GPS andmeseeria keskmine erineb staatilise mõõtmise keskmisest X koordinaadis 5 mm, Y koordinaadis 3 mm ja kõrguses 26 mm.

Tabel 22. Maa-ameti RTN võrgu VRS teenuse ainult GPS andmeseeria ja staatilise mõõtmise keskmine (m) ning nende standardhälbed (mm)

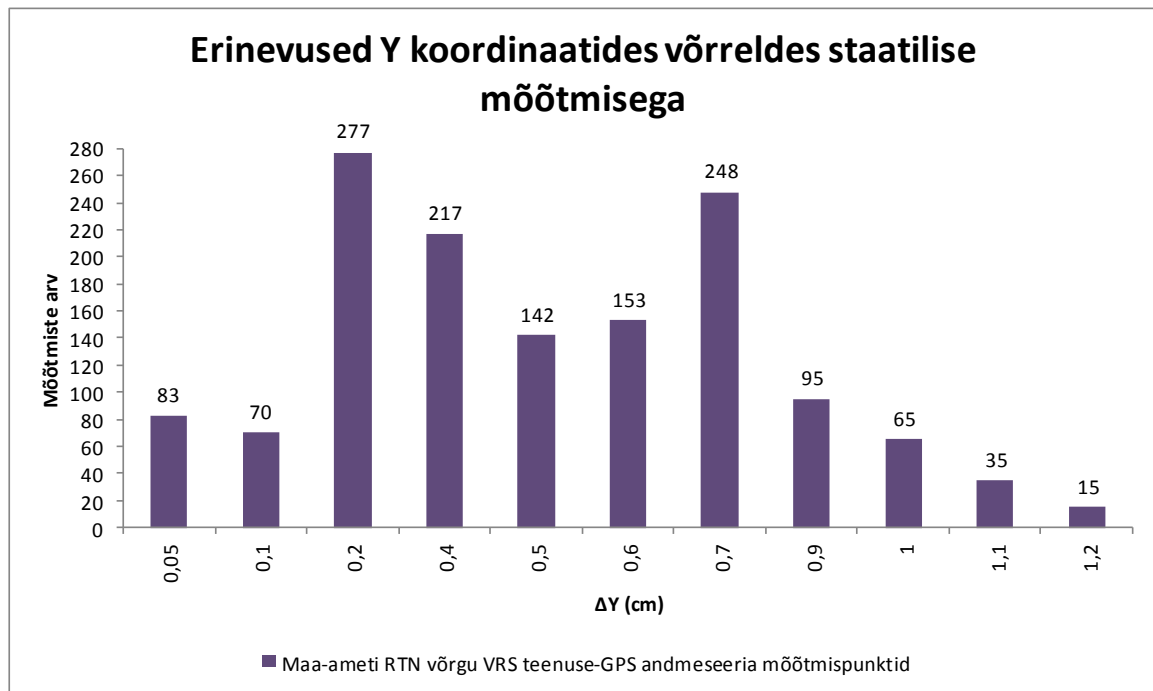
GNSS süsteem	X	Y	h	Std X	Std Y	Std h
GPS	6573092,113	690117,549	85,694	7,228	3,829	12,198
Staatiline mõõtmine	6573092,119	690117,546	85,668	2,754	1,633	9,215

X koordinaatide osas on üle 1 cm (k.a. 1 cm) suuruse veaga 427 punkti (joonis 47) ja üle 2 cm (k.a. 2 cm) suurusi vigu on 36 mõõtmispunktil.



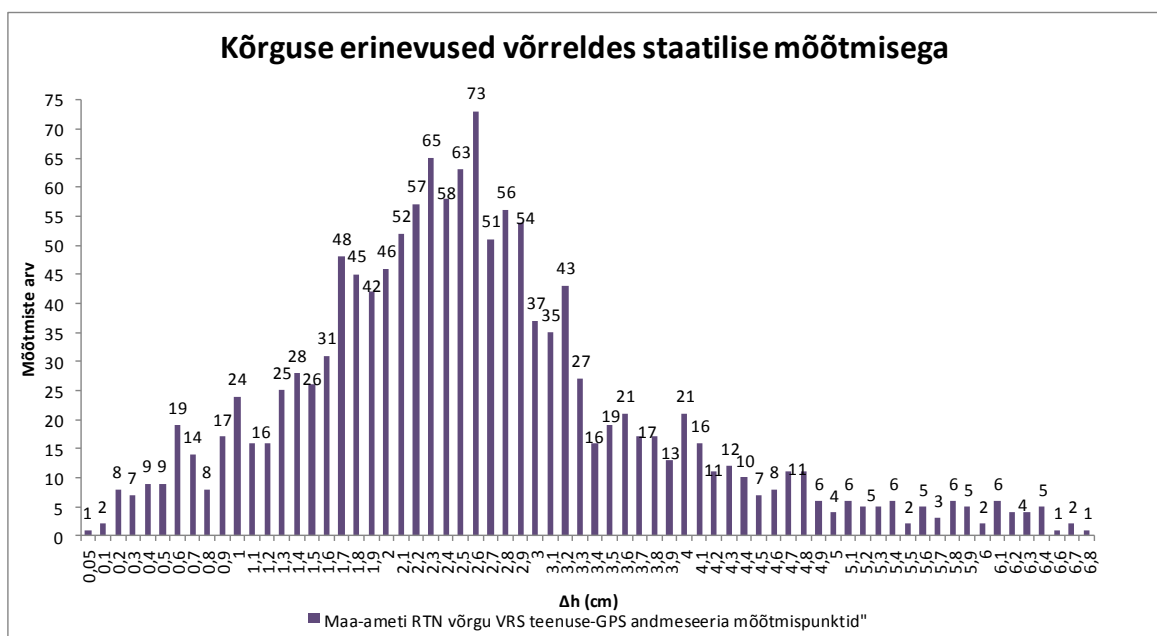
Joonis 47. Erinevused X koordinaatides võrreldes staatilise mõõtmisega. Maa-ameti võrk ainult GPS signaalid.

Y koordinaatide erinevuste (joonis 48) suurim väärtus on 1,2 cm. Üle 1 cm (k.a. 1 cm) suuruse veaga on 115 mõõtmispunkti. Enamus erinevusi jäävad 0,2 ja 0,7 cm piiridesse.



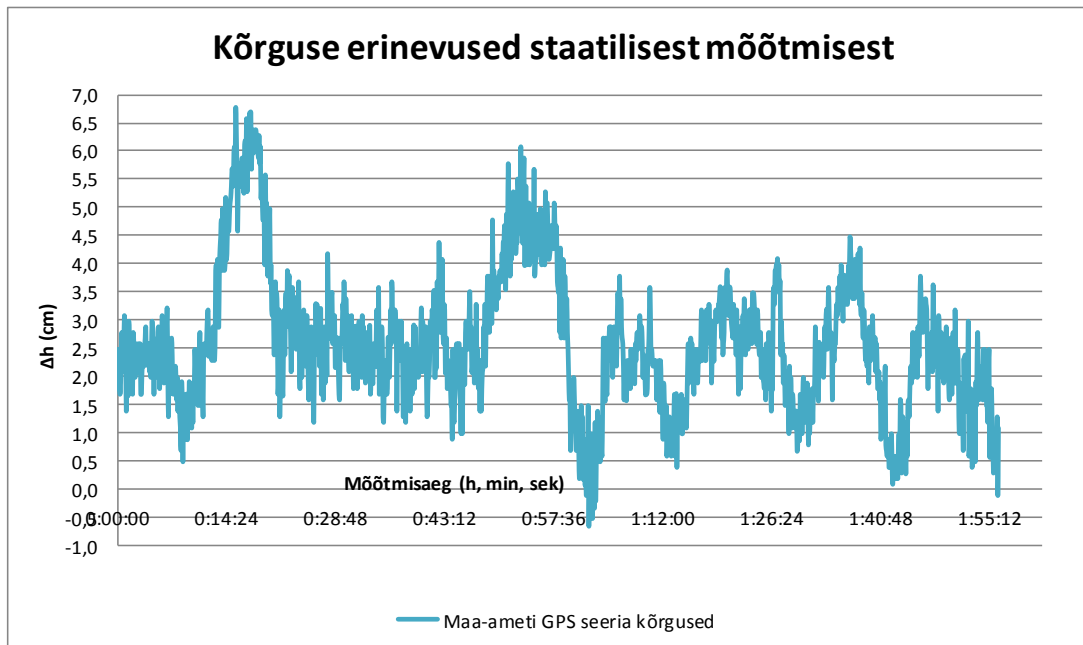
Joonis 48. Erinevused Y koordinaatides võrreldes staatilise mõõtmisega. Maa-ameti võrgu ainult GPS signaalid.

Kõrguse erinevuste maksimaalne arv on 6,8 cm (joonis 49). Enamus vigu jäävad 1,5 cm ja 3,5 cm vahele. Üle 2 cm (k.a. 2 cm) suurune viga on 575 punktil, üle 3 cm (k.a. 3 cm) suuruse veaga on 245 punkti ja üle 4 cm (k.a. 4 cm) suurune viga on 185 mõõtmispunktil.



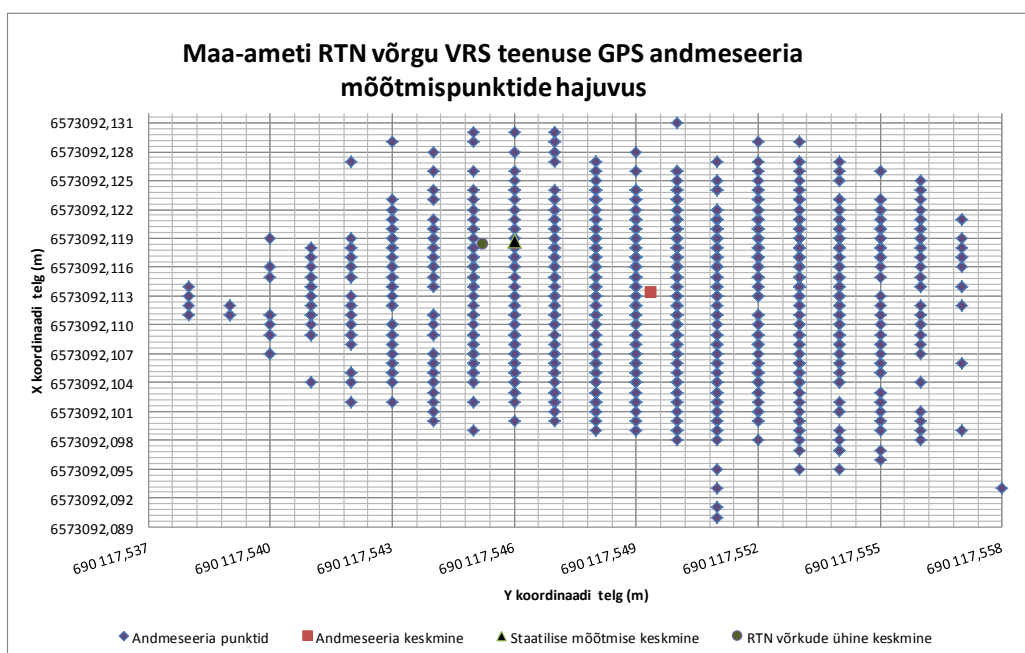
Joonis 49. Kõrguse erinevused võrreldes staatilise mõõtmisega. Maa-ameti võrgu ainult GPS signaalid.

Kõrgused erinesid staatilisest mõõtmisest intervallis -7 cm kuni 1 cm. Joonisel 50 on näha, et kõrgused kõiguvad küllalt palju. Suured kõikumised viivad standardhälbe 12 cm-le ning süstemaatiline viga on 2,5 cm.



Joonis 50. Kõrguse erinevused staatilisest mõõtmisest. Maa-ameti võrgu ainult GPS signaalid.

Joonisel 51 võib näha, et suurem osa andmeseeria mõõtmispunktide Y koordinaadi osas paikneb keskmisest paremal, seega Y koordinaat on süstemaatilises nihkes umbes 5 mm. X koordinaadi osas süstemaatiline nihe sisuliselt puudub.



Joonis 51. Maa-ameti võrgu VRS teenuse GPS andmeseeria vigade jaotus.

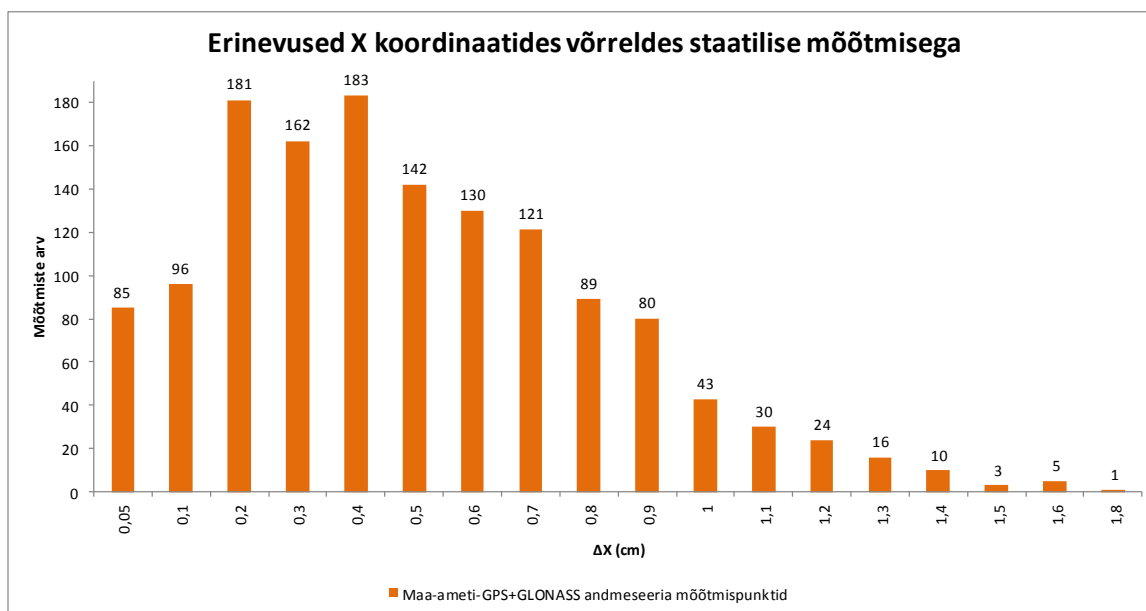
3.5.2. GPS+GLONASS signaalide põhine mõõtmine

Tabelis 23 on näha, et GPS+GLONASS andmeseeria keskmine erineb staatilisest mõõtmisest X koordinaadis 4 mm, Y koordinaadis 2 mm ja kõrguses 32 mm.

Tabel 23. Maa-ameti RTN võrgu VRS teenuse GPS+GLONASS andmeseeria ja staatilise mõõtmise keskmised (m) ning standardhälbed (mm)

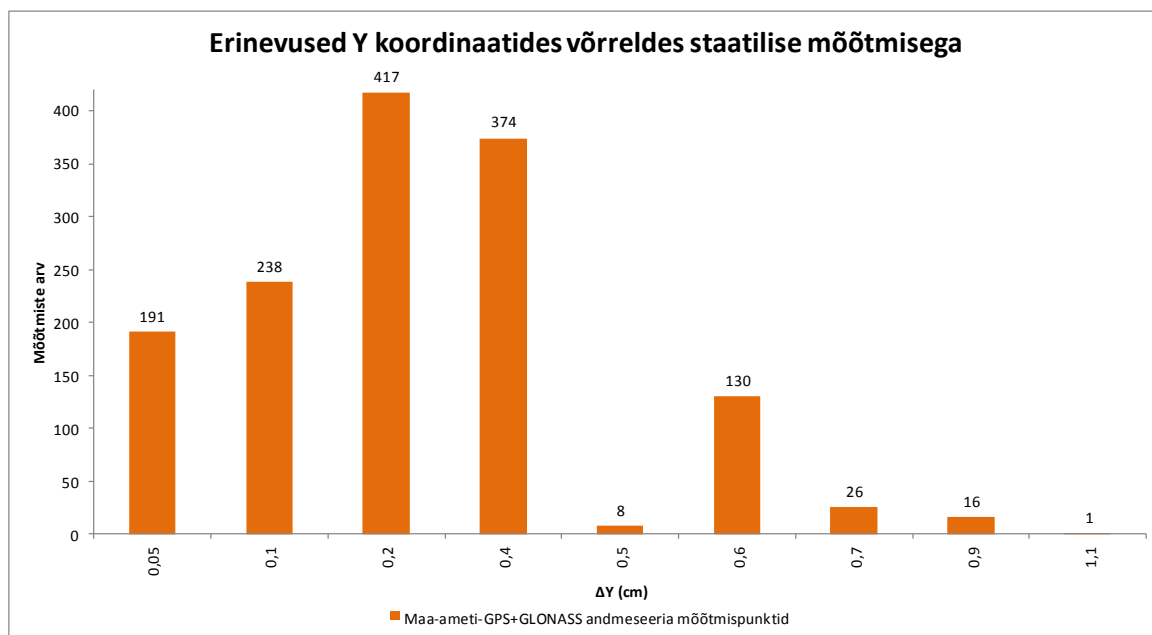
GNSS süsteem	X	Y	h	Std X	Std Y	Std h
GPS+GLONASS	6573092,115	690117,544	85,700	4,395	2,428	6,850
Staatiline mõõtmine	6573092,119	690117,546	85,668	2,754	1,633	9,215

Enamus mõõtmispunktidel on X koordinaadi vead alla 1 cm (joonis 52). Üle 1 cm (k.a. 1 cm) suuruse veaga on 132 punkti, ainult GPS signaalidega seerias oli neid punkte 427. Seega üle 1 cm suuruse veaga punktide arv on vähenenud rohkem kui poole võrra.



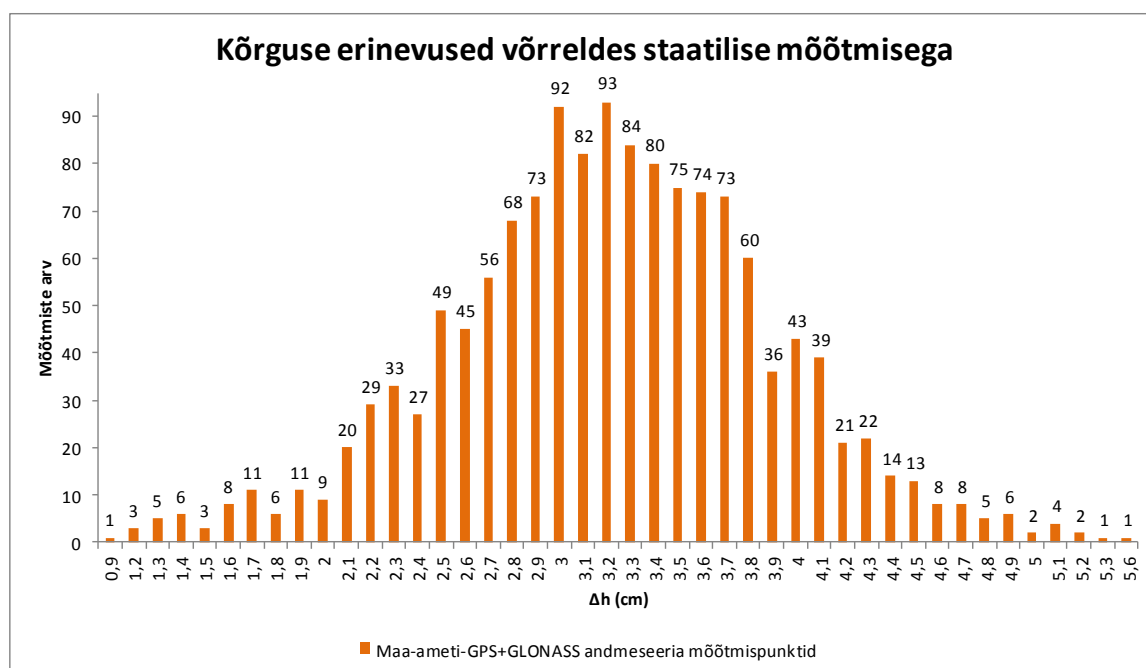
Joonis 52. Erinevused X koordinaatides võrreldes staatilise mõõtmisega. Maa-ameti võrgu GPS+GLONASS signaalid.

Joonisel 53 oleval tulpdiagrammil on näha, et Y koordinaatide andmeseerias on 1401 mõõtmispunkti, millest 1400 punktil erinevused staatilise mõõtmisest ei ületa 1 cm ning üle 1 cm suurune viga on ainult 1 mõõtmispunktil. Vaid GPS signaalidega andmeseeriates oli üle 1 cm suurusi vigu 115 mõõtmispunktil.



Joonis 53. Erinevused Y koordinaatides võrreldes staatilise mõõtmisega. Maa-ameti võrgu GPS+GLONASS signaalid.

Joonisel 54 kujutatud kõrguste erinevuste graafik sarnaneb GPS andmeseeria graafikuga. Üle 2 cm (k.a. 2 cm) suurune viga on 409 punktil, üle 3 cm (k.a. 3 cm) suuruse veaga on 749 mõõtmispunkti ning üle 4 cm (k.a. 4 cm) suurune viga on 189 mõõtmispunktil.

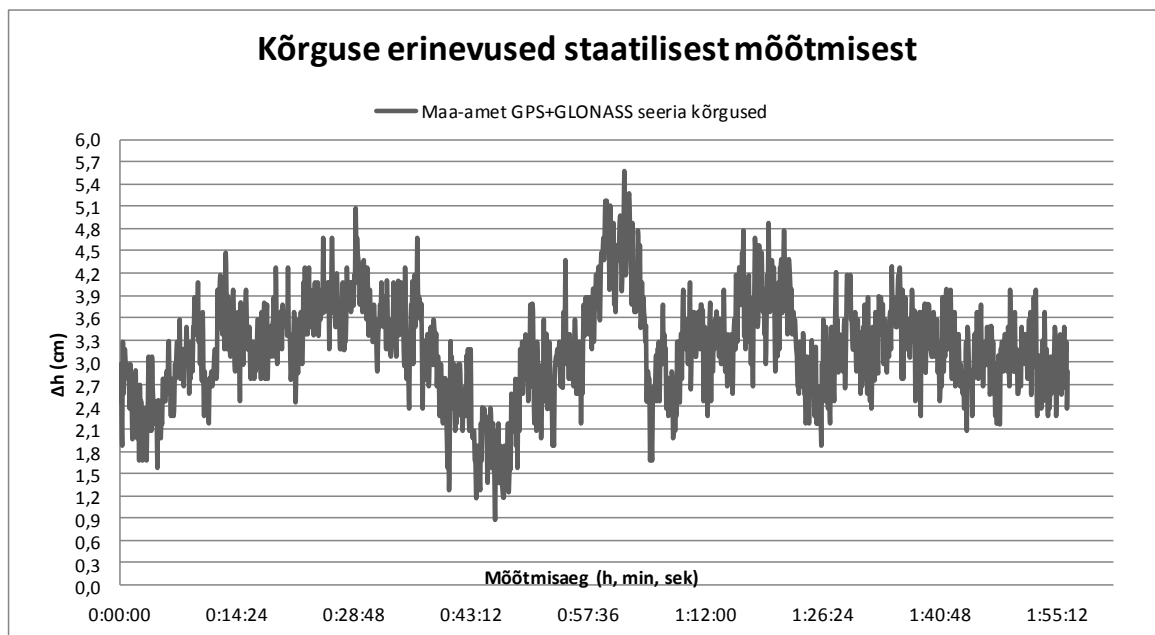


Joonis 54. Kõrguse erinevused võrreldes staatilise mõõtmisega. Maa-ameti võrgu GPS+GLONASS signaalid.

Vaadates vaid GPS signaalidega tehtud mõõtmist, siis üle 1 cm suuruse veaga punkte on 5 korda rohkem, üle 2 cm (k.a. 2 cm) suuruseid vigu on 166 punkti võrra rohkem kui

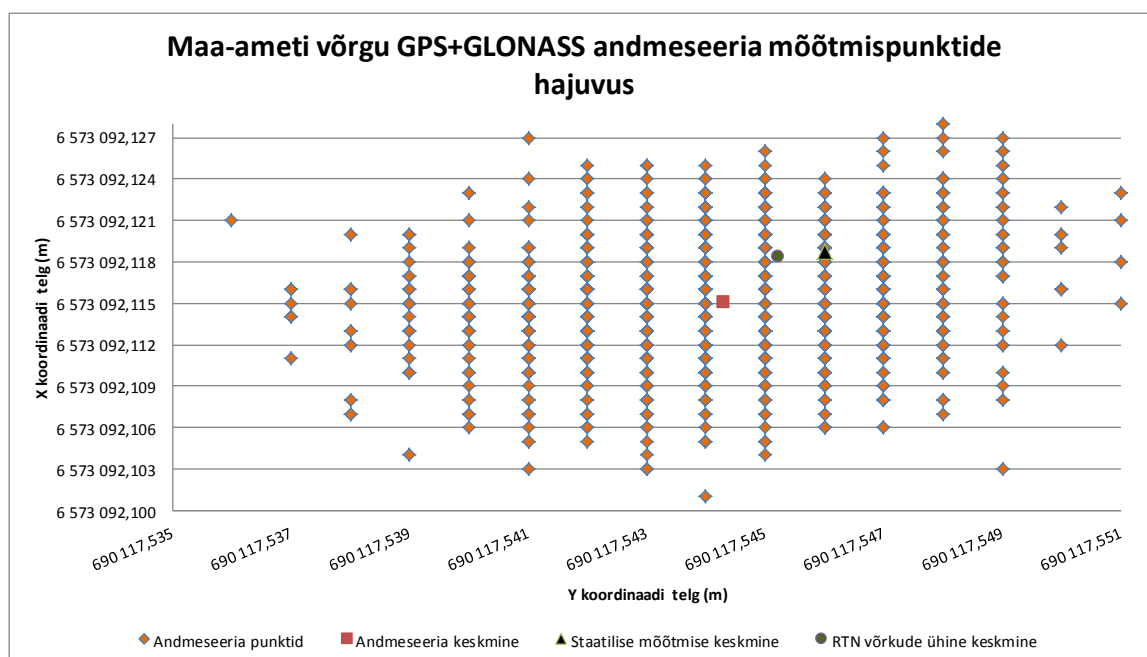
joonisel 54. Samas on vaid GPS signaalidega andmeseerias üle 4 cm (k.a. 4 cm) suuruse veaga punkte on veidi vähem kui GPS+GLONASS signaalidega andmeseerias.

Vaadates joonist 55 näeme selgelt süstemaatilist viga 3 cm ja küllalt väikest standardhälvet: 6,8 cm. Mingeid erilisi kõrvalekaldeid ei esine, seega paranditevoog on olnud ühtlane. Sama suur ja samasuunaline süstemaatiline viga esines ka GPS signaalidega mõõtes.



Joonis 55. Kõrguse erinevused staatilisest mõõtmisest. Maa-ameti võrgu GPS+GLONASS signaalid.

Joonisel 56 võib näha, et süstemaatilist nihet X ja Y koordinaadi osas peaaegu pole, mida võis märgata vaid GPS signaalidega mõõtes.



Joonis 56. Maa-ameti RTN võrgu VRS teenuse GPS+GLONASS andmeseeria vigade jaotus.

3.5.3. Kahe mõõteseeria omavaheline võrdlus – GPS versus GPS-GLONASS

Kahe andmeseeria keskmised on välja toodud tabelis 24. Maa-ameti võrgu GPS andmeseeria keskmine erineb GPS+GLONASS keskmisest X koordinaadis 2 mm, Y koordinaadis 5 mm ja ellipsoidi kõrguses 6 mm.

Tabel 24. Maa-ameti RTN võrgu VRS teenuse GPS ja GPS+GLONASS andmeseeriade keskmised (m) ja standardhälbed (mm)

GNSS süsteem	X	Y	h	Std X	Std Y	Std h
GPS	6573092,113	690117,549	85,694	7,228	3,829	12,198
GPS+GLONASS	6573092,115	690117,544	85,700	4,395	2,428	6,850
Staatiline mõõtmine	6573092,119	690117,546	85,668	2,754	1,633	9,215

Mõõtes ainult GPS signaalide abil olid standardhälbed halvemad. Kõrguse osas on vahe lausa pool. Mõlema mõõtmise kõrgused on tulnud 2-3 cm kõrgemad. Samas on kõrguse täpsus GPS signaalidega parem, kuigi vaid mõni mm. Ainult GPS signaalidega mõõtes on kõrguse osas üle 4 cm suurusi vigu mõnevõrra vähem. Kõrguse osas esines regulaarselt süstemaatiline viga, mis annaks põhjust kahtlustada tugijaamade väärtusi, aga seda süstemaatilist viga ei esine i-MAX meetodi kasutamisel Maa-ameti võrgus. Seega võib oletada, et süstemaatiline viga on tingitud ikkagi VRS modelleerimise probleemidest.

3.6. Testmõõtmised ja tulemused Maa-ameti võrgu i-MAX teenuse abil

Maa-ameti võrgus i-MAX teenust kasutades, sooritati mõõtmisi 27 novembril 2017.a. Antenni kõrgus tsentrisse oli 1,734 m ning andmeid salvestati iga 5 sekundi tagant. Mõõtmisi, kus kasutati ainult GPS signaale tehti kell 11:20-13:20, selle ajaga salvestati 1504 mõõtmispunkti ning vastuvõtja jälgis ~6 satelliiti. Mõõtmiste ajal oli temperatuur 0°C lähedane, tuulekiirus 5 m/s ja 2% niiskus. Mõõtmisi, kus kasutati GPS+GLONASS signaale, tehti kell 13:30-15:30. Selle ajaga salvestati 1267 mõõtmispunkti ning vastuvõtja jälgis ~20 satelliiti. Ilmaolud olid +1°C, tuulekiirus 5 m/s, 2% niiskus.

3.6.1. Ainult GPS signaalide põhine mõõtmine

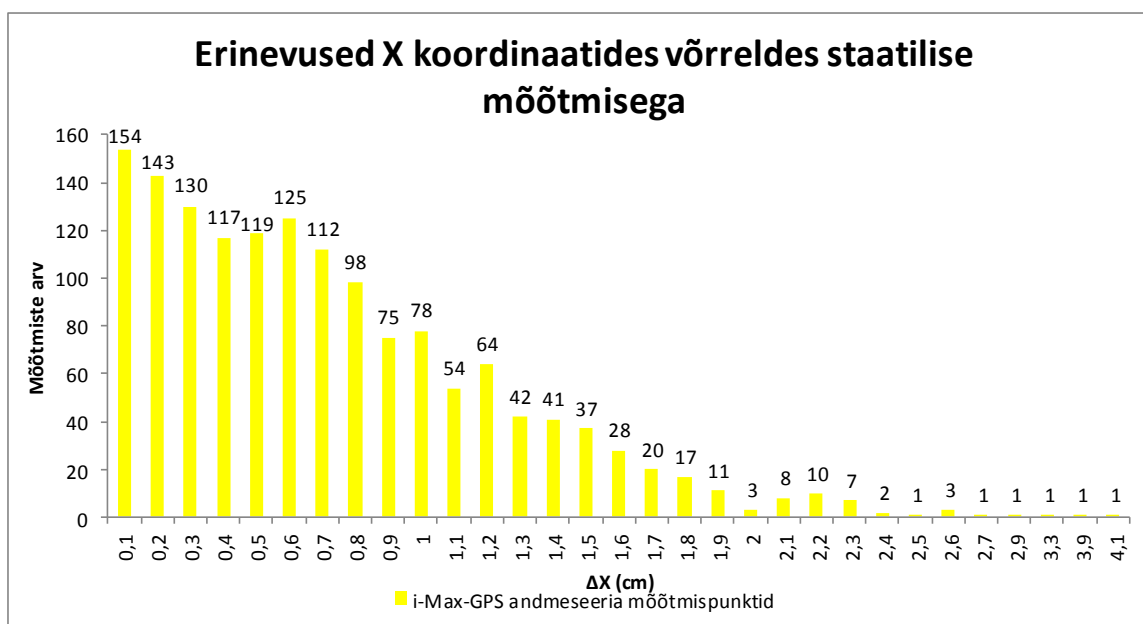
Nagu kõikide teiste mõõtmistulemuste puhul on ka Maa-ameti võrgu i-MAX teenuse GPS andmeseeria punktidest oli arvutatud keskmine väärtus ja standardhälbed (tabel 25). I-MAX teenuse ainult GPS andmeseeria keskmine erineb staatilisest mõõtmisest X koordinaadis 2 mm, Y koordinaadis 3 mm ja kõrguses 1 mm.

Tabel 25. Maa-ameti võrgu i-MAX teenuse GPS andmeseeria ja staatilise mõõtmise keskmine (m) ning nende standardhälbed (mm)

GNSS süsteem	X	Y	h	Std X	Std Y	Std h
GPS	6573092,117	690117,549	85,667	8,498	5,899	15,399
Staatiline mõõtmine	6573092,119	690117,546	85,668	2,754	1,633	9,215

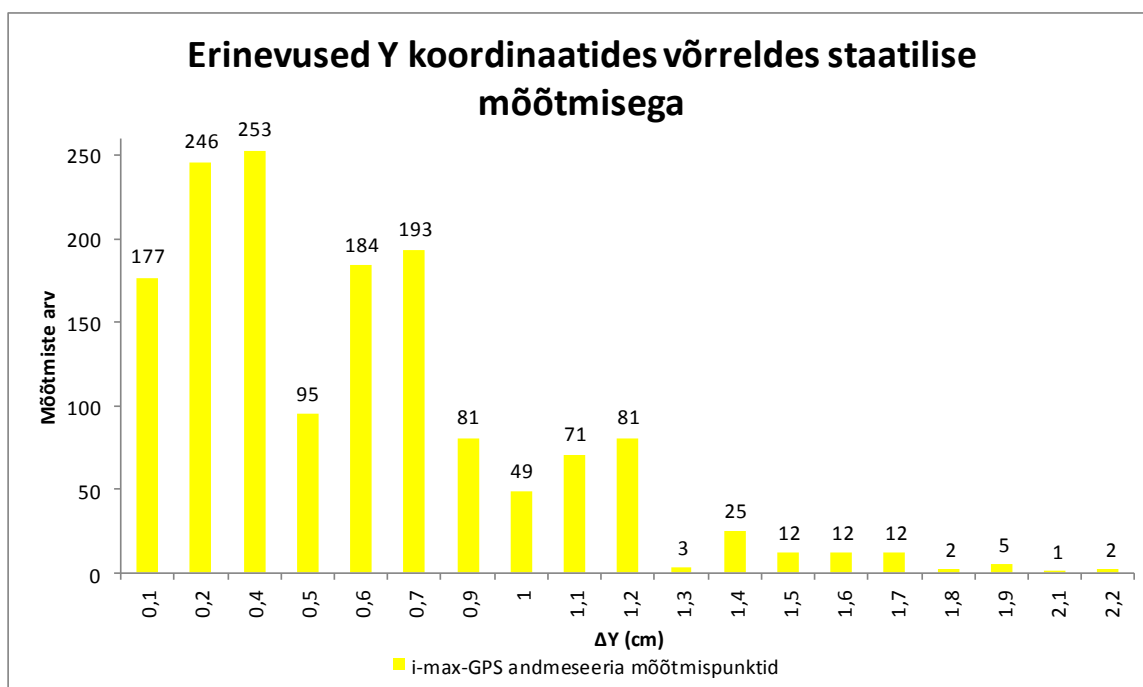
Maa-ameti i-MAX teenuse GPS andmeseeria maksimaalseks erinevuseks staatilisest mõõtmisest X koordinaadis on ~4,1 cm, Y koordinaadis 2,20 cm ja kõrguses ~5,6 cm.

X koordinaadi erinevused (joonis 57) enamuse mõõtmispunktidel on alla 1 cm. Üle 1 cm (kaasaarvatud 1 cm) suuruse veaga on 392 punkti, üle 2 cm (k.a. 2 cm) suuruse veaga on 36 punkti.



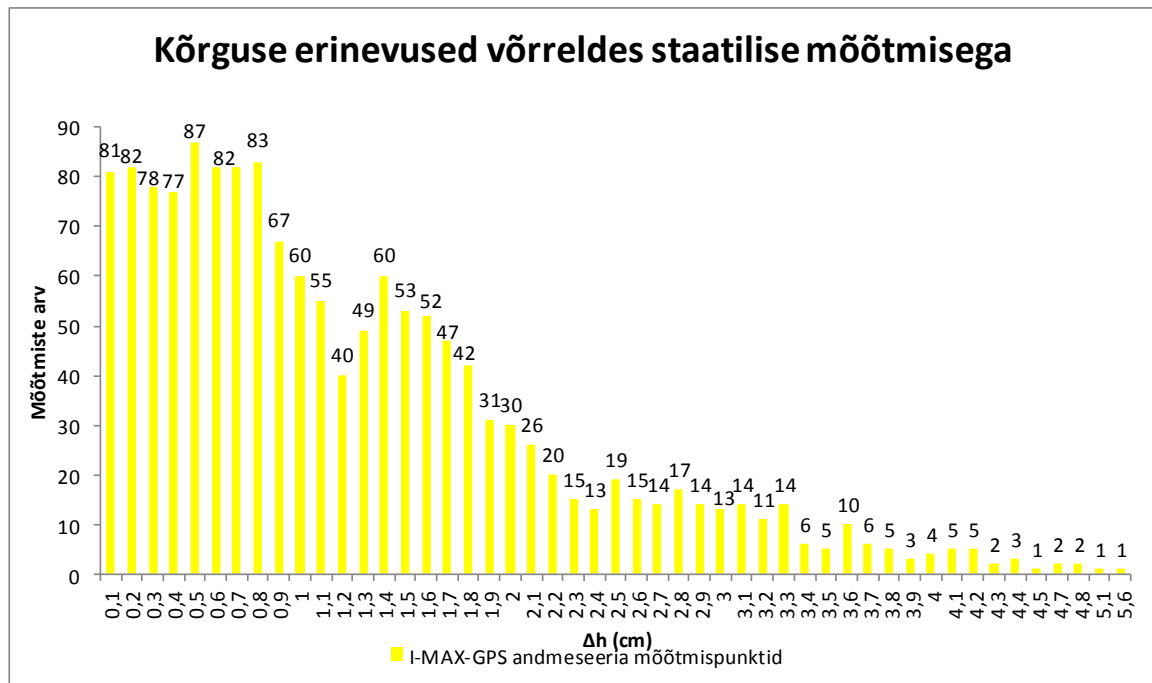
Joonis 57. Erinevused X koordinaatides võrreldes staatilise mõõtmisega. I-MAX teenuse ainult GPS signaalid.

Y koordinaadi erinevuste graafik (joonis 58) sarnaneb teiste võrkude GPS andmeseeria graafikutega, kuid juhuslikke vigu on rohkem. Üle 1 cm (k.a. 1 cm) suuruse veaga on 272 punkti ja üle 2 cm suurusi vigu on 3 mõõtmispunktil.



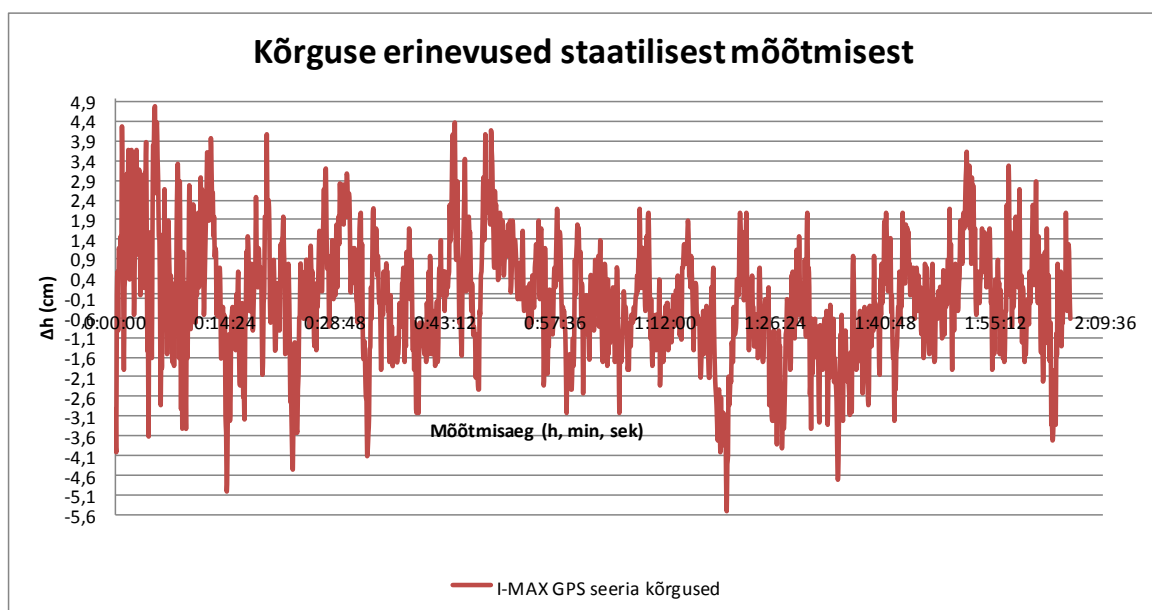
Joonis 58. Erinevused Y koordinaatides võrreldes staatilise mõõtmisega. I-MAX teenuse ainult GPS signaalid.

Kõrguse osas (joonis 59) on üle 2 cm (k.a. 2 cm) suuruse veaga punkte 183, üle 3 cm (k.a. 3 cm) suuruse veaga on 87 punkti ning üle 4 cm (k.a. 4 cm) suurune viga on 26 mõõtmispunktil.



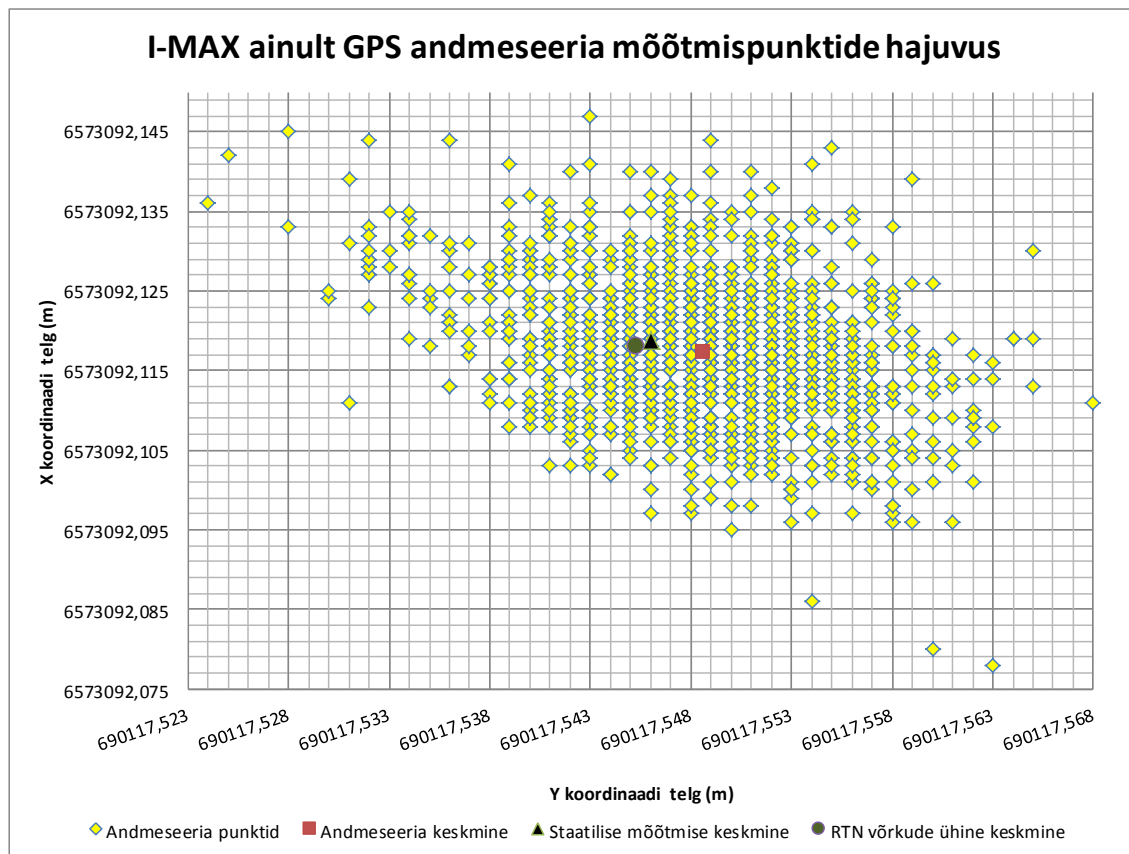
Joonis 59. Kõrguse erinevused võrreldes staatilise mõõtmisega. I-MAX teenuse ainult GPS signaalid.

Maksimaalne viga on 6 cm ja minimaalne -5 cm (joonis 60). Üldiselt graafik on ühtlane.



Joonis 60. Kõrguse erinevused staatilisest mõõtmisest. I-MAX teenuse ainult GPS signaalid.

I-MAX teenuse GPS andmeseeria (joonis 61) mõõtmispunktid paiknevad tiheda „pilvena“ staatilise väärtuse ümber. Samuti on märgata, et antud graafikul süstemaatiline viga sisuliselt puudub.



Joonis 61. Maa-ameti võrgu i-MAX teenuse GPS andmeseeria vigade jaotus.

3.6.2. GPS+GLONASS signaalide põhine mõõtmine

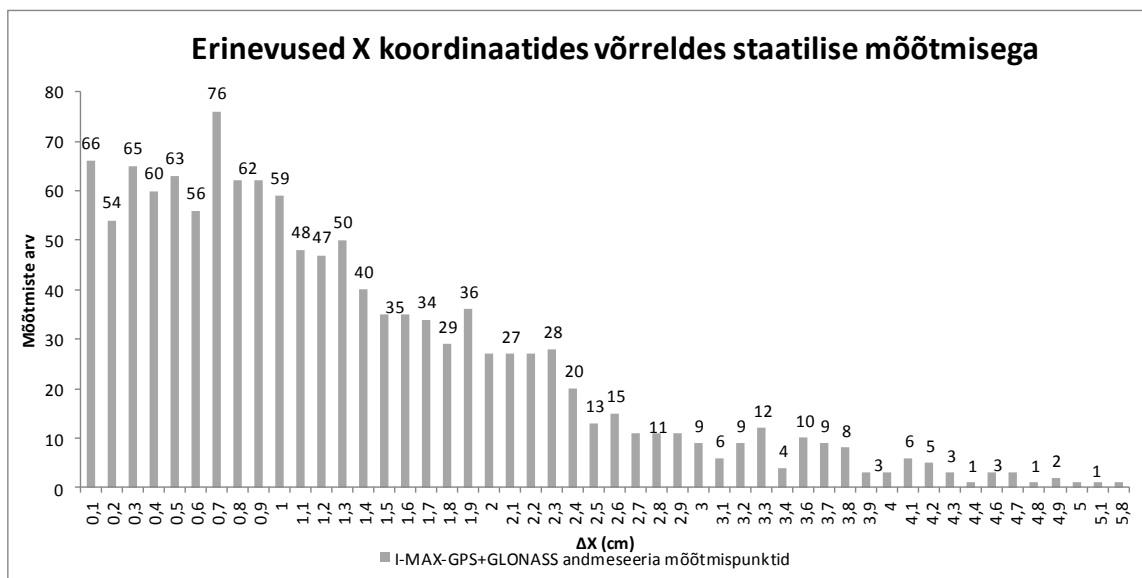
Andmeseeria keskmine (tabel 26) erineb staatilisest mõõtmisest X koordinaadis 9 mm, Y koordinaadis 7 mm ja kõrguses 3 mm.

Tabel 26. Maa-ameti võrgu i-MAX teenuse GPS+GLONASS andmeseeria ja staatilise mõõtmise keskmised (m) ning nende standardhälbed (mm)

GNSS süsteem	X	Y	h	Std X	Std Y	Std h
GPS+GLONASS	6573092,128	690117,553	85,665	13,02	6,685	17,415
Staatiline mõõtmine	6573092,119	690117,546	85,668	2,754	1,633	9,215

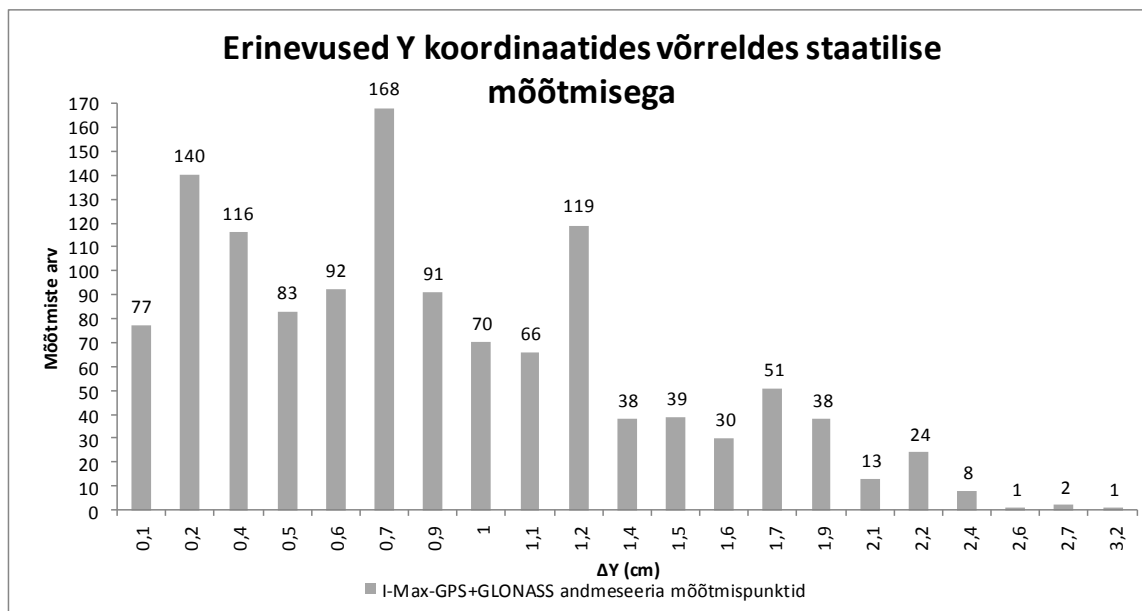
X koordinaatide erinevuste graafik (joonis 62) on natuke pikem kui ainult GPS andmeseeria graafik. Üle 1 cm (k.a. 1 cm) suuruse veaga on 413 punkti ja üle 4 cm (k.a. 4 cm) suurune viga on 27 punktil. Juhuslike vigade suuremad väärtused ulatuvad ligi 6 cm-ni. GPS andmeseeria X koordinaatide erinevuste graafikult näeme, et üle 2 cm suuruse

veaga on vaid 36 punkti ning ainult 3 punktil on üle 3 cm suurune viga. Seega GPS signaalidega seerias on üksikuid suuremaid vigu oluliselt vähem.



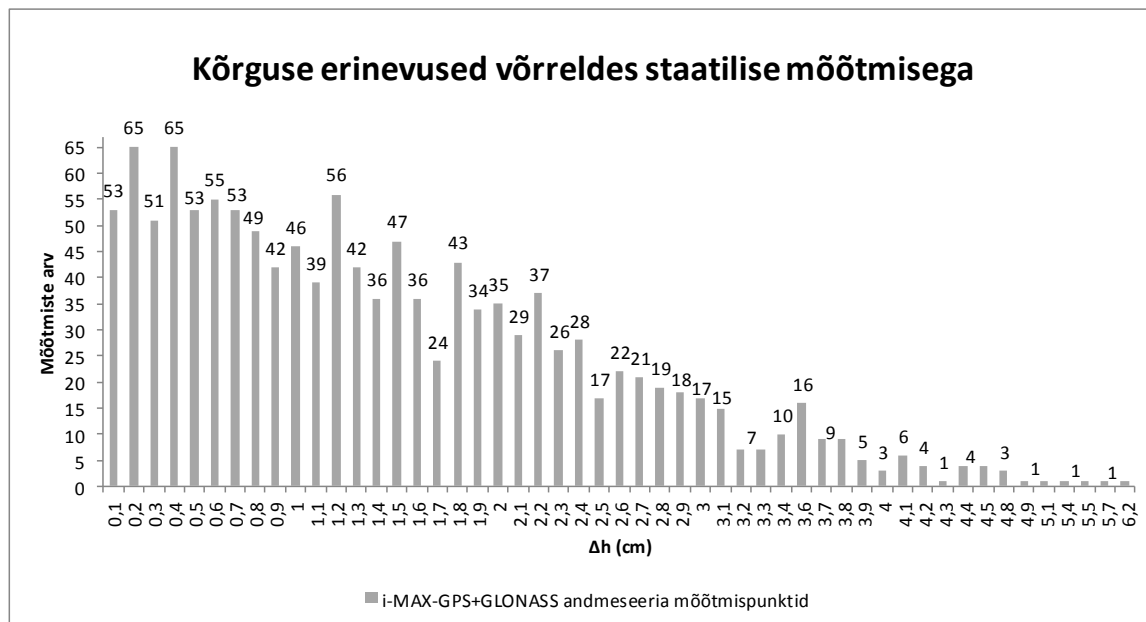
Joonis 62. Erinevused X koordinaatides võrreldes staatilise mõõtmisega. I-MAX teenuse GPS+GLONASS signaalid.

Joonisel 63 võib panna tähele, et üle 1 cm (k.a. 1 cm) suuruse veaga on 451 punkti ning üle 2 cm suurune viga on 49 mõõtmispunktil. Vaid GPS andmeseerial oli nende vigadega punkte oluliselt vähem.



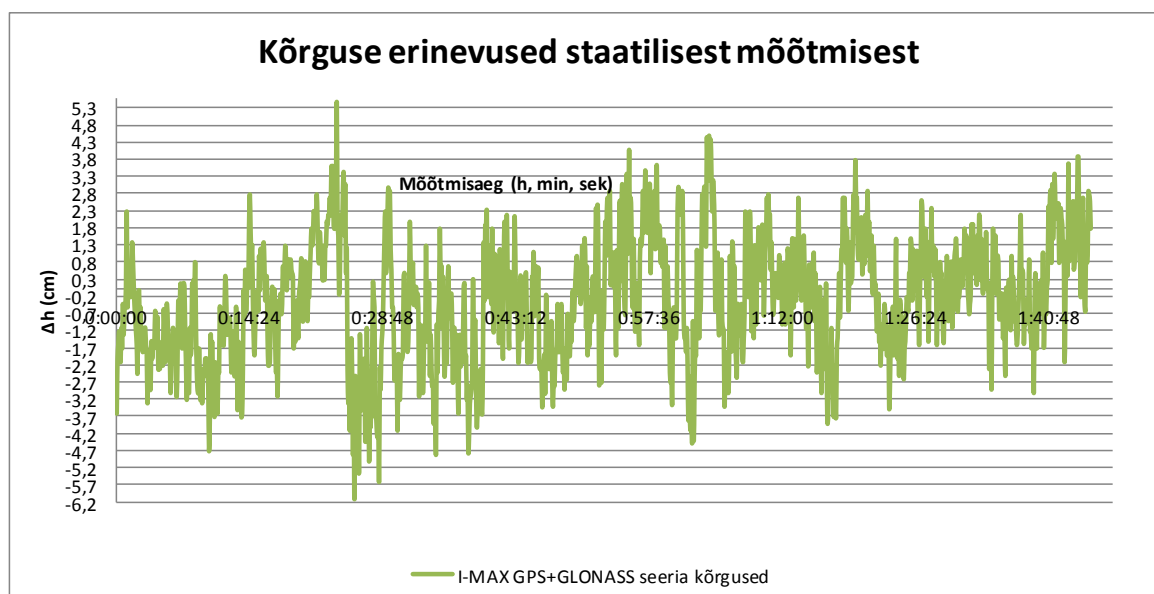
Joonis 63. Erinevused Y koordinaatides võrreldes staatilise mõõtmisega. I-MAX teenuse GPS+GLONASS signaalid.

Kõrguse erinevuste graafik (joonis 64) näitab, et üle 2 cm (k.a. 2 cm) suurune viga on 190 punktil. Lisaks üle 3 cm (k.a. 3 cm) suuruse veaga on 70 punkti. Kui võrrelda GPS seeria mõõtmistulemustega, siis olid seal vead veidi väiksemad.



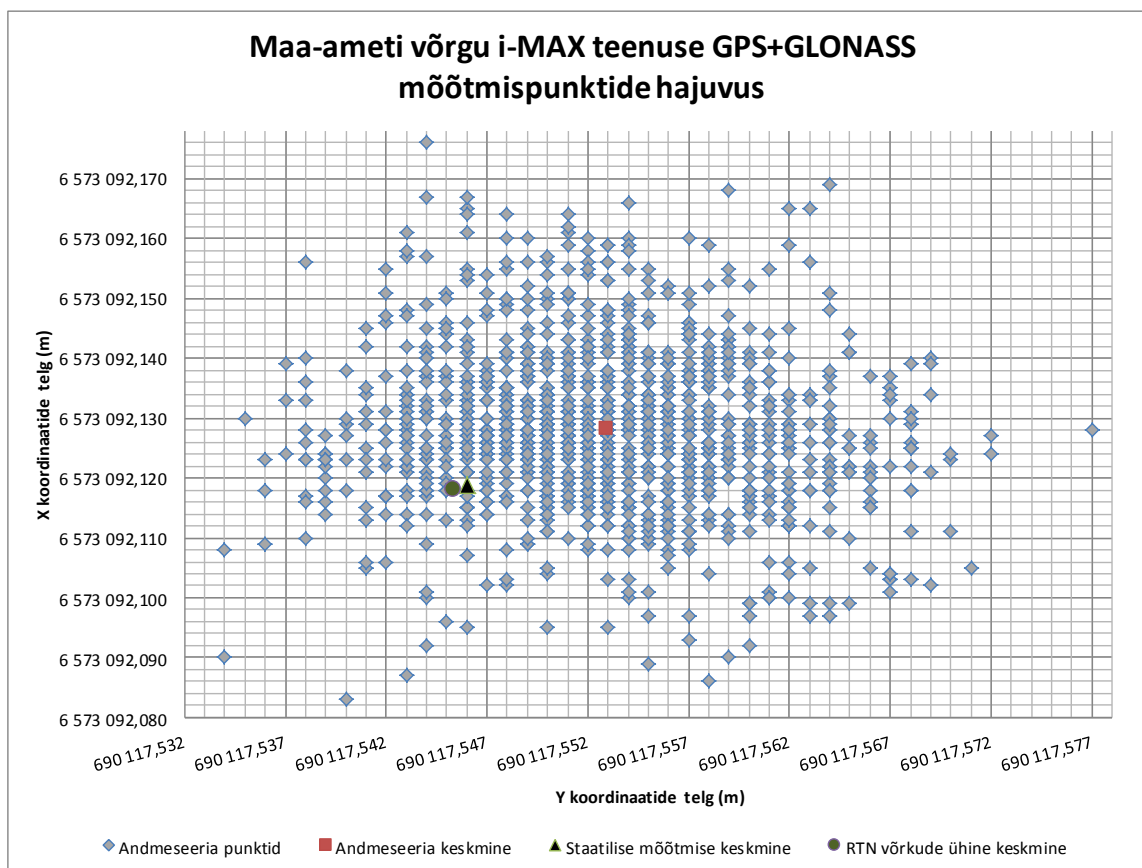
Joonis 64. Kõrguse erinevused võrreldes staatilise mõõtmisega. I-MAX teenuse GPS+GLONASS signaalid.

Joonisel 65 on näha, et tulemused kõiguvad keskmise suhtes pluss 4 cm ja miinus 4 cm vahel. Võib näha väikest süstemaatilist viga, aga hoopis teises suunas, kui oli VRS teenuse korral.



Joonis 65. Kõrguse erinevused staatilisest mõõtmisest. I-MAX teenuse GPS+GLONASS signaalid.

Joonisel 66 on näha, et Y koordinaadis on umbes 7 mm suurune süstemaatiline nihe.



Joonis 66. Maa-ameti võrgu i-MAX teenuse GPS+GLONASS andmeseeria vigade jaotus.

3.6.3. Kahe andmeseeria omavaheline võrdlus – GPS versus GPS+GLONASS

Maa-ameti võrgu i-MAX teenuse mõlema andmeseeria keskmised (tabel 27) erinevad omavahel X koordinaadis 11 mm, Y koordinaadis 4 mm ja h kõrguses 2 mm võrra. Tabelis 27 on näha, et tulemused on väga sarnased ning kõrguse standardhälve on sisuliselt sama. Mainima peab siiski keskmisest suuremat standardhälvet, mis kajastus suuremates juhuslikes vigades, kui näiteks VRS teenuse korral.

Tabel 27. Maa-ameti i-MAX teenuse GPS ja GPS+GLONASS andmeseeriade keskmised (m) ja standardhälbed (mm)

GNSS süsteem	X	Y	h	Std X	Std Y	Std h
GPS	6573092,117	690117,549	85,667	8,498	5,899	15,399
GPS+GLONASS	6573092,128	690117,553	85,665	13,02	6,685	17,415
Staatilese mõõtmine	6573092,119	690117,546	85,668	2,754	1,633	9,215

3.7. Testmõõtmised ja tulemused Maa-ameti võrgu Toila baasjaama abil

Maa-ameti võrgu Toila baasjaama kasutades sooritati mõõtmisi 24 novembril 2017.a. Antenni kõrgus oli 1,740 m ning andmeid salvestati iga 5 sekundi tagant. Mõõtmistel kasutati ainult GPS signaale ning sooritati neid kell 12:12-13:42. Sellel ajal oli näha ~10 satelliiti ja väliarvuti salvestas 1146 mõõtmispunkti. Mõõtmiste ajal temperatuur oli +2⁰C, tuulekiirus 6 m/s ja 71% niiskus.

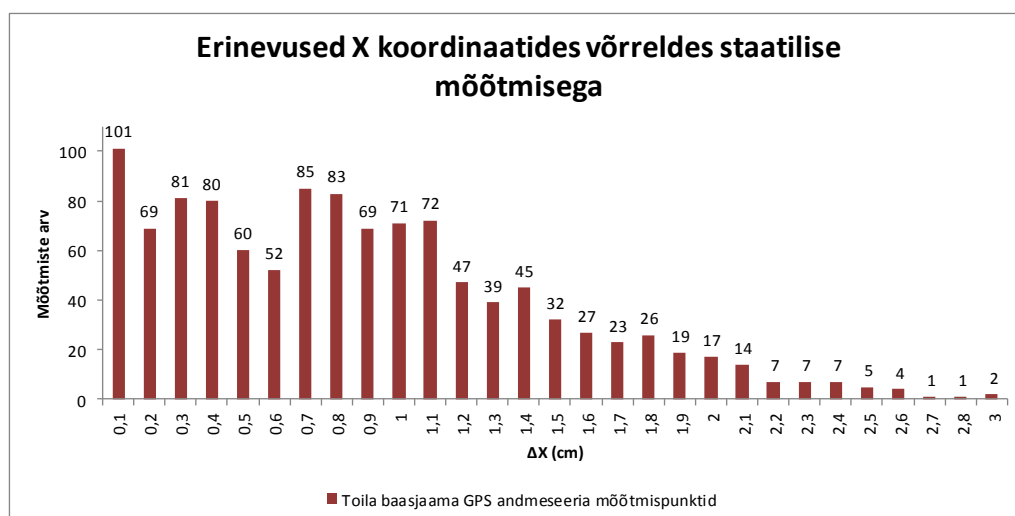
3.7.1. Ainult GPS signaalide põhine mõõtmine

Toila baasjaama GPS andmeseerias oli arvutatud keskmine ning selle standardhälved. Tabelis 28 on näha, et GPS andmeseeria keskmine erineb staatilise mõõtmise keskmisest X koordinaadis 5 mm, Y koordinaadis 9 mm ja kõrguses 0 mm.

Tabel 28. Toila baasjaama GPS andmeseeria ja staatilise mõõtmise keskmine (m) ning standardhälbed (mm)

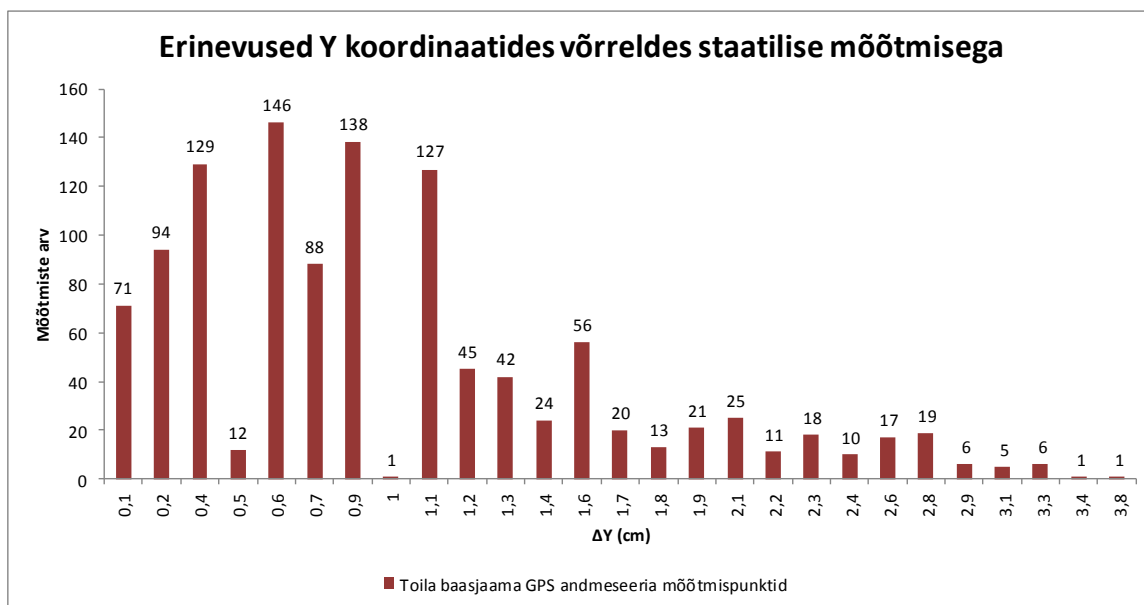
GNSS süsteem	X	Y	h	Std X	Std Y	Std h
GPS	6573092,114	690117,537	85,668	8,855	7,482	16,494
Staatiline mõõtmine	6573092,119	690117,546	85,668	2,754	1,633	9,215

Kõige suurem erinevus staatilisest mõõtmisest on X koordinaadis ~3 cm, Y koordinaadis 3,70 cm ja kõrguses ~5,8 cm. Joonisel 67 on näha üle 1 cm (k.a. 1 cm) suuruse veaga on 401 mõõtmispunkti.



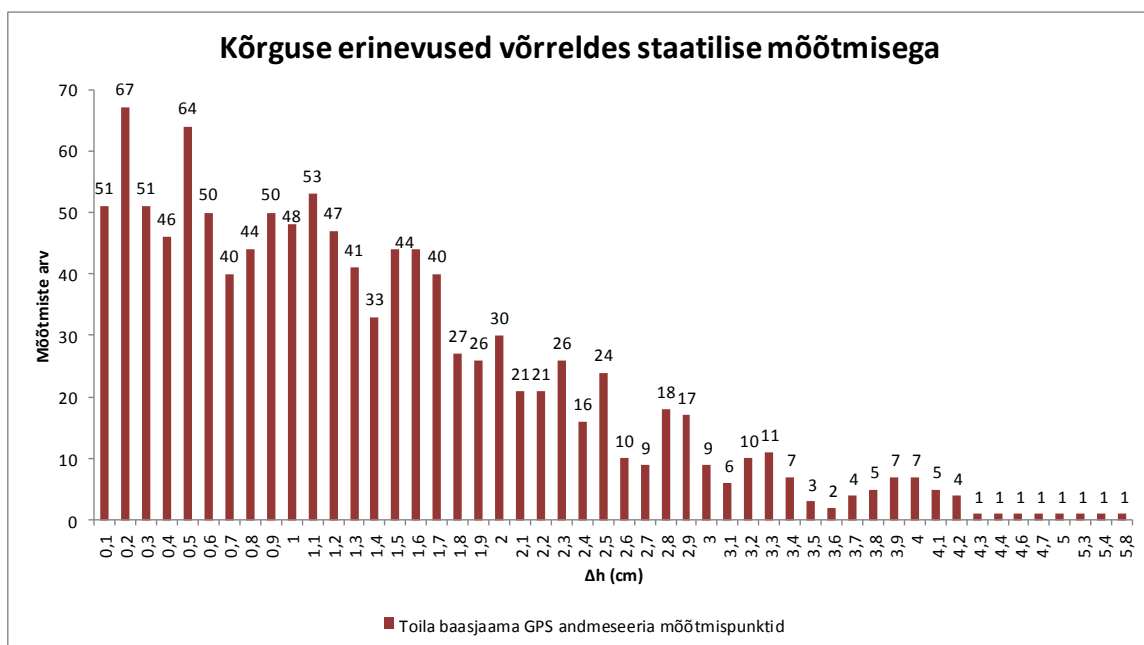
Joonis 67. Erinevused X koordinaatides võrreldes staatilise mõõtmisega. Toila baasjaama ainult GPS signaalid.

Y koordinaatide osas (joonis 68) on üle 2 cm suurune viga 106 punktil.



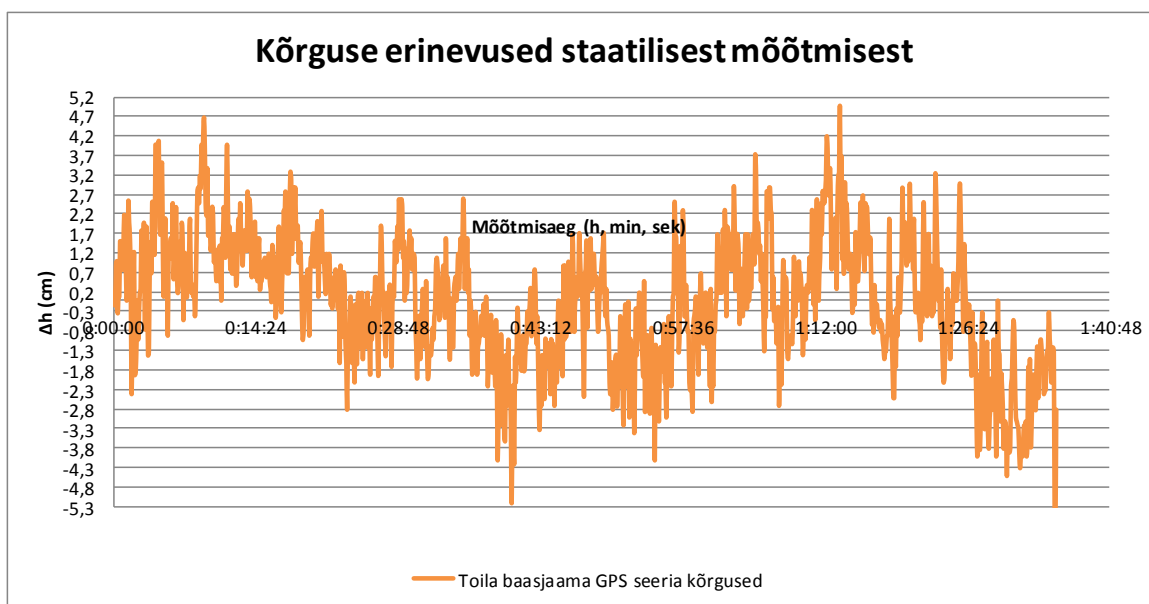
Joonis 68. Erinevused Y koordinaatides võrreldes staatilise mõõtmisega. Toila baasjaama ainult GPS signaalid.

Kõrguses (joonis 69) on üle 2 cm (k.a. 2 cm) suurune viga 192 punktil. Üldiselt sarnaneb graafik võrgu RTK tulemustega.



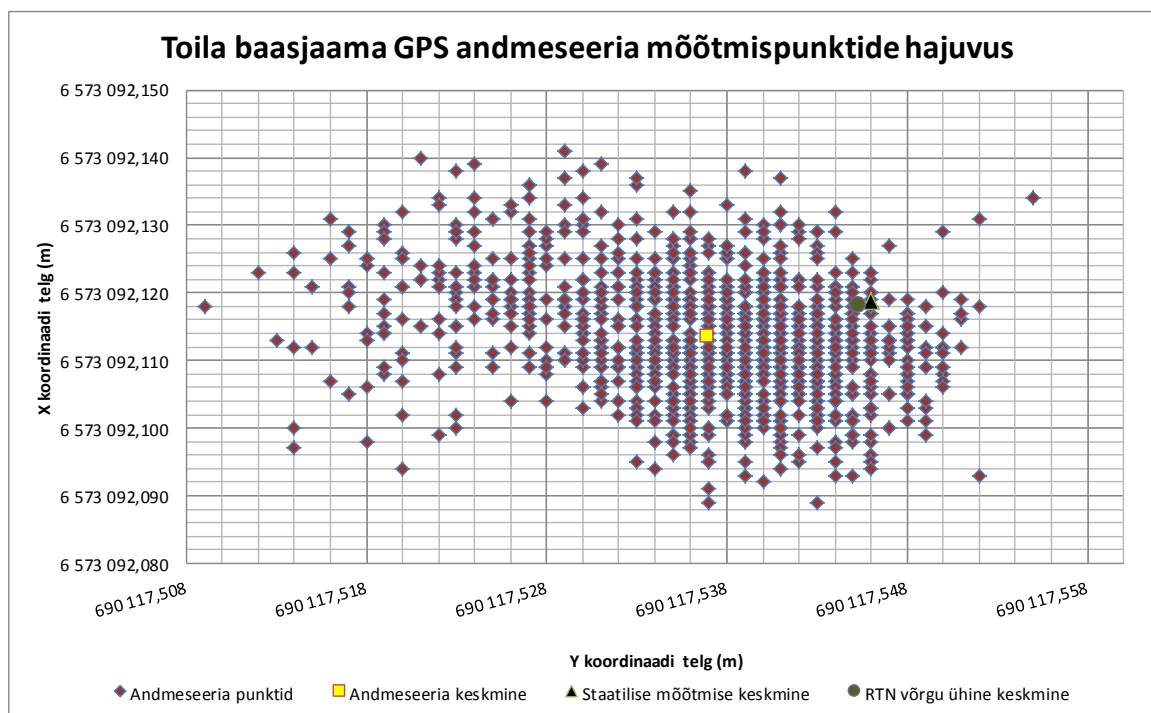
Joonis 69. Kõrguse erinevused võrreldes staatilise mõõtmisega. Toila baasjaama ainult GPS signaalid.

Joonisel 70 on näha, et suurim kõrguse erinevus on 6 cm ja väikseim -5 cm. Samuti esineb lisaks lühemale lainele ka 45 minutiline laine, mida on raske seletada.



Joonis 70. Kõrguse erinevused staatilisest mõõtmisest. Toila baasjaama ainult GPS signaalid.

Y koordinaadid (joonis 71) paiknevad staatilise mõõtmise keskmisest umbes 8 mm süstemaatilise veaga.

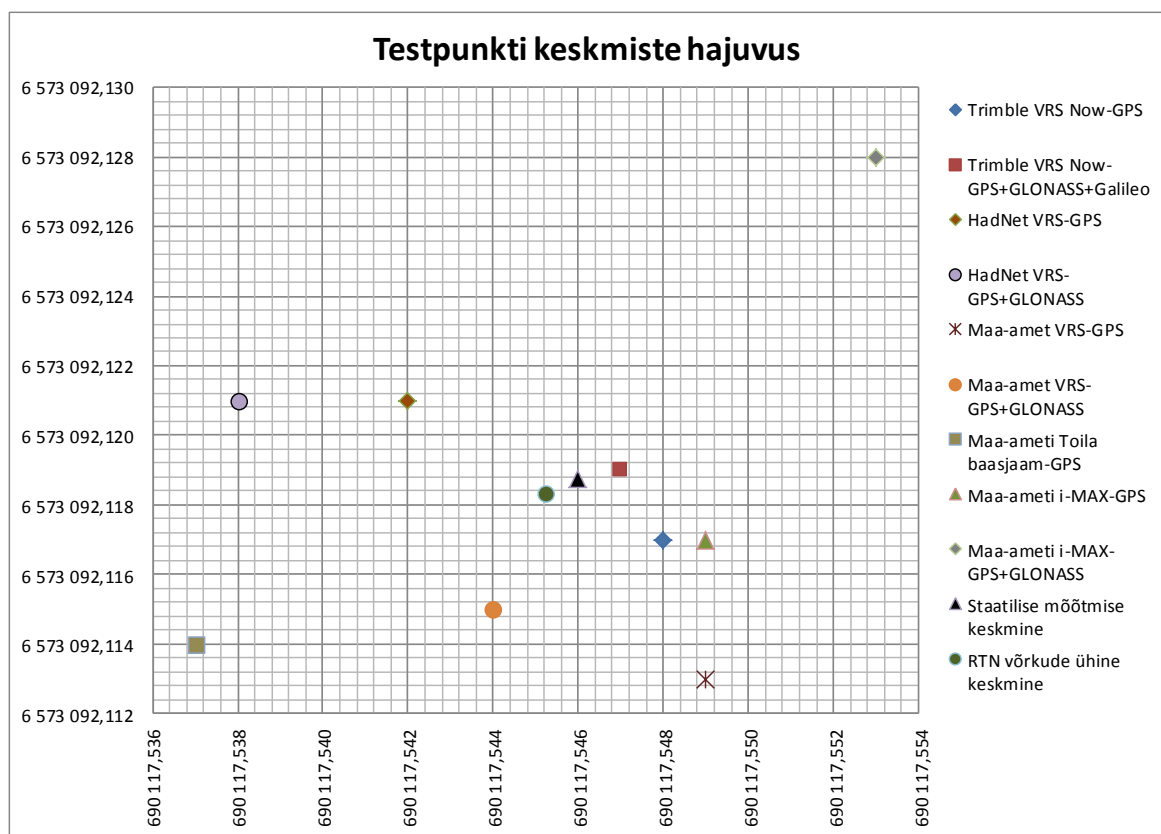


Joonis 71. Toila baasjaama GPS andmeseeria vigade jaotus.

4. KOONDANALÜÜS JA ARUTELU

Töös on uuritud võrgu RTK teenuse täpsust, selle püsivust ja sõltuvust signaalidest ning teenusepakkujatest. Eelnevalt on ükshaaval toodud täpsust hindavad testid erinevates RTK võrkudes ja kasutades erinevaid mõõtesignaale. Tabelis 29 on näha, et RTK mõõtmiste kõikide seeriade keskmiste väärtus erineb staatilisest mõõtmisest X ja Y koordinaadi osas alla 1 mm, vaid kõrguses ulatub erinevus 1 cm-ni. Referentsväärtusena on kasutatud staatilise mõõtmise tulemust.

Joonisel 72 on kujutatud mõõteseeriade X ja Y koordinaadi keskmiste asukohti staatilise mõõtmise (must kolmnurk) suhtes. Andmeseeriade keskmiste väärtuste tähised on legendil. Joonisel 72 on näha, et X koordinaadi osas erineb enim Maa-ameti võrgu i-MAX teenuse GPS+GLONASS andmeseeria tulemus: 9 mm. Teised erinevused jäävad oluliselt väiksemaks. Y koordinaadi osas erineb enim Toila üksik baasjaam ainult GPS signaalidega ja HadNet GPS+GLONASS VRS lahendus: mõlemad ~1 cm ja samas suunas. Teised tulemused jäävad erinevateks vaid mõne mm piires. Ka ei ole märgata, et mõõtmiste keskmised paikneks süstemaatilises nihkes.



Joonis 72. Eesti RTN võrkude abil tehtud mõõtmiste andmeseeriade keskmiste paigutus staatilise mõõtmise suhtes.

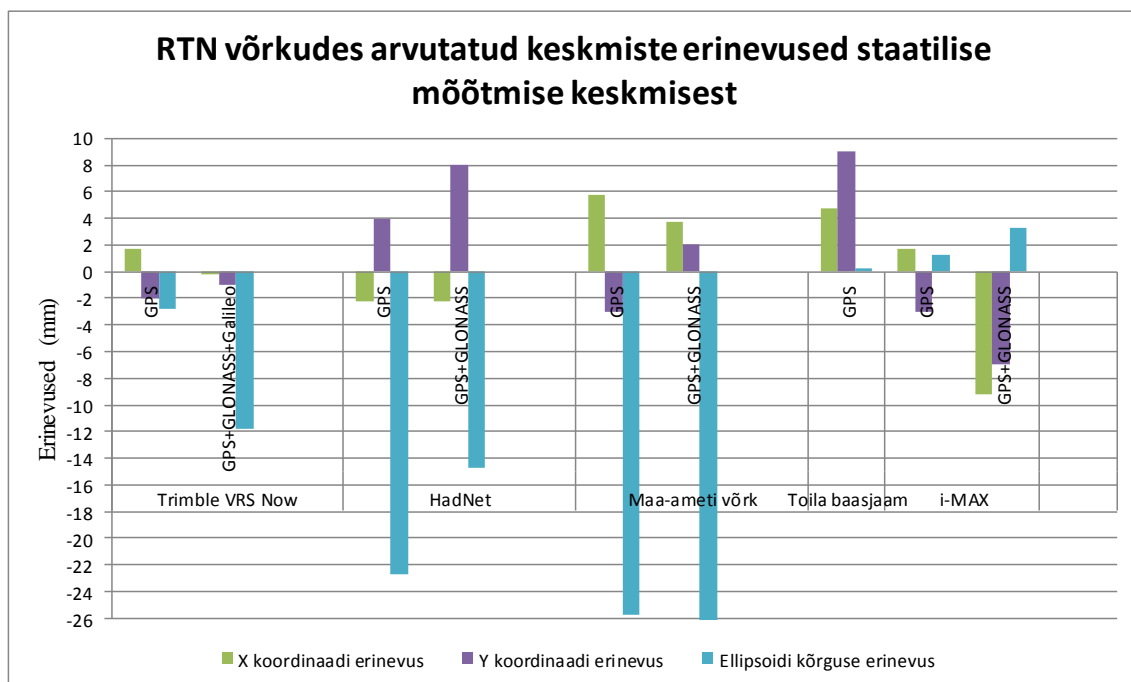
Ka tabel 29 näitab RTK mõõtmiste keskmiste tulemuste erinevusi staatilise mõõtmise suhtes. Kõrguses esineb kolm suuremat erinevust: -3,2, -2,6 ja -2,3 cm. Kaks nendest on Maa-ameti VRS teenuse kaudu tehtud mõõtmised. Kuna seda tendentsi ei ole näha mõõtmistest, kus lähemal tugijaamal on suurem kaal (Toila ja i-MAX), võib kahtlustada just VRS modelleerimist. Samas suunas on nihkes ka HadNet VRS teenuse tulemused. Esineb süstemaatiline nihe (joonis 72 ja joonis 73). Keskmise ruutviga (krv) on siiski väike, X koordinaadis 1,9 cm, Y koordinaadis 2,6 cm ning kõrguses 28,6 cm (krv arvutati Gaussi valemiga). Kõrguse osas oleks see veel väiksem, kui eemaldada süstemaatiline viga. Süstemaatiline viga võib natuke olla põhjustatud ka testpunkti enda väärtusest.

Tabel 29. RTN võrkude andmeseeriade keskmiste erinevused staatilisest mõõtmisest (staat.keskm-andmeseeria keskm, mm)

RTN võrk	GNSS süsteemi tüüp	Erinevused (mm)		
		Staatilise mõõtmise keskmisest		
		X	Y	h
Trimble VRS Now	GPS	1,8	-2	-2,8
	GPS+GLONASS+Galileo	-0,3	-1	-11,8
HadNet	GPS	-2,3	4	-22,8
	GPS+GLONASS	-2,3	8	-14,8

Maa-ameti VRS teenus	GPS	5,8	-3	-25,8
	GPS+GLONASS	3,8	2	-31,8
Maa-ameti Toila baasjaam	GPS	4,8	9	0,3
Maa-ameti i-MAX teenus	GPS	1,8	-3	1,3
	GPS+GLONASS	-9,3	-7	3,3
Keskmine ruutviga (krv)		19,4	26,3	286,16
RTN võrkude ühine keskmine		0,4	0,8	-11,6

Eespool toodud alusel oli loodud tulpdiagramm, mis illustreerib RTN võrkude erinevate andmeseeriade keskmiste erinevusi staatilisest mõõtmisest (joonis 73).



Joonis 73. RTN võrkude erinevate andmeseeriade keskmiste väärtuste erinevused staatilisest mõõtmisest.

4.1. Maksimaalsed juhuslikud vead

Tabelis 30 on toodud andmeseeriade keskmised tulemused, RTN võrkude ühine keskmine, standardhälbed ning maksimaalsed erinevused staatilisest mõõtmisest.

Tabelis 30 on näha, et vaid ühes kombinatsioonis oli kõrguse osas maksimaalsed vead oluliselt väiksemad kui muidu – 3,5 cm. See oli Trimble VRS võrgus juhul, kui kasutati vaid GPS signaale. Kõigil teistel juhtudel ulatusid kõrguslikud juhuslikud vead 6 cm-ni. Mõõtes üksikult tugijaamalt on Y koordinaadi osas juhuslikud vead selgelt suuremad kui muidu, ulatudes 3,7 cm-ni. X koordinaadi osas näeme suurimaid juhuslikke vigu HadNet ja

Maa-amet i-MAX teenuse osas. Seda on raske põhjendada. Ainuke võrk, kus maksimaalsed juhuslikud vead on väiksemad nii X, Y kui h osas, on Trimble VRS Now ja seda juhul, kui kasutada vaid GPS signaale. Vaadates X ja Y koordinaate koos ilma kõrguseta, on hea tulemus saadud veel Maa-ameti VRS teenuse kaudu ja HadNet võrgu kaudu vaid GPS signaalidega. Ka HadNet võrgus tuleb ilmsiks ainult GPS signaalidega mõõtmise eelis.

Juhuslikke vigu saab üldisemat hinnata ka standardhälbe kaudu. Kõrguse osas saab eelise Maa-ameti VRS teenus. HadNet võrgu osas näeme, et GLONASS-i lisamine halvendab standardhälvet tunduvalt. Muidu seda ei tähelda. Standardhälbed püsivad ühtlaselt head nii X, Y kui h osas vaid Trimble ja Maa-ameti VRS teenuse korral. Kõige ebatäpsem X koordinaadi osas on HadNet koos GLONASS signaalidega.

Ka tabel 31 näitab suuremate vigade esinemissagedust. Ainult GPS signaalidega tehtud mõõtmistes on suuri vigu vähem. Kõrguses on üle 2 cm vigu vähem, kui mõõtmised on tehtud ainult GPS signaalidega. Erandiks on vaid Hadnet võrk. Siin GLONASS-i lisamine vähendab suuri vigu ja samuti standardhälvet just kõrguse osas. X ja Y koordinaadi osas on ka siin vaid GPS signaalidega tehtud mõõtmised väiksemate juhuslike vigadega. Sellele kõrguse tulemusele on raske seletust anda.

4.2. Seeriaste keskmiste väärtuste õigsus

Seeriaste keskmine tulemus on X ja Y koordinaadi osas peaaegu veatu kõikides võrkudes. Keskmine tulemus kõrguse osas tuli suurema veaga vaid Maa-ameti VRS teenuse korral, u 3 cm.

Tabel 30. RTK ja staatilise mõõtmise testpunkti koordinaatide koontabel

RTK võrgu nimetus	GNSS tüüp	Andmeseeriade keskmised väärtused (m)			Standardhälved (mm)			Andmeseeria max. erinevused alusväärtusest (cm)		
		X	Y	h	X	Y	h	ΔX	ΔY	Δh
Trimble VRS Now	GPS	6573092,117	690117,548	85,671	5,72	2,89	10,05	2,33	1,10	3,53
	GPS+GLONASS+Galileo	6573092,119	690117,547	85,680	4,55	2,36	9,88	2,03	1,00	6,58
HadNet VRS	GPS	6573092,121	690117,542	85,691	7,59	3,74	12,88	3,23	1,60	6,78
	GPS+GLONASS	6573092,121	690117,538	85,683	19,69	5,84	16,68	4,53	2,50	5,38
Maa-amet VRS	GPS	6573092,113	690117,549	85,694	7,23	3,83	12,20	2,88	1,20	6,78
	GPS+GLONASS	6573092,115	690117,544	85,700	4,40	2,43	6,85	1,78	1,00	5,58
Maa-ameti Toila baasjaam	GPS	6573092,114	690117,537	85,668	8,86	7,48	16,49	2,98	3,70	5,73
Maa-ameti i-Max	GPS	6573092,117	690117,549	85,667	8,50	5,90	15,40	4,08	2,20	5,53
	GPS+GLONASS	6573092,128	690117,553	85,665	13,02	6,69	17,42	5,73	3,10	6,13
Staatiline mõõtmine	Trimble VRS Now	6573092,121	690117,545	85,672	2,75	1,63	9,22	0,33	0,20	0,58
	HadNet	6573092,117	690117,547	85,665				0,28	0,20	1,33
Staatilise mõõtmise keskmine väärtus = alusväärtus (m)		6573092,119	690117,546	85,668						
RTN võrkude ühine keskmine (m)		6573092,118	690117,545	85,680						

Tabel 31. Andmeseeriade erinevuste koondtabel

RTN võrk	GNSS süsteem	Mõõtmispunk- tide üldarv	ERINEVUSED (mõõtmispunktide arv)								
			X koordinaadis			Y koordinaadis			Kõrguses		
			Üle 1 cm	Üle 2 cm	Üle 3 cm	Üle 1 cm	Üle 2 cm	Üle 3 cm	Üle 2 cm	Üle 3 cm	Üle 4 cm
Trimble VRS Now	GPS	7409	892	23	-	63	-	-	611	33	-
	GPS+GLONASS +Galileo	6666	352	2	-	6	-	-	278	17	74
HadNet	GPS	6512	1319	156	6	410	-	-	1945	1428	562
	GPS+GLONASS	6790	1822	1864	1048	2415	252	-	1732	892	407
Maa-ameti VRS teenus	GPS	1400	427	36	-	115	-	-	575	245	185
	GPS+GLONASS	1401	132	-	-	1	-	-	409	749	189
Maa-ameti i- MAX	GPS	1504	392	36	3	272	3	-	183	87	26
	GPS+GLONASS	1267	413	190	100	451	48	1	252	95	31
Toila baasjaam	GPS	1146	401	63	2	349	106	13	192	64	24

5. KOKKUVÕTE

Käesoleva magistritöö eesmärgiks on uurida võrgu RTK ja RTK meetodi täpsust ja lahendi stabiilsust Eesti erinevates RTK püsijaamade võrkudes. Uurimisülesandeks on kindlaks teha mõõtmistäpsuse püsimine pikema aja jooksul, juhuslike vigade sagedus ja süstemaatilise vea olemasolu. Samuti selgitada välja, kas ainult GPS signaalidega mõõtes on mõõtmistäpsus parem ja juhuslikke vigu vähem.

Kirjanduse ülevaade annab ülevaate GNSS signaalidest ja Eesti RTN võrkudest. Samuti toob välja mõningaid tähelepanekuid, et ainult GPS signaaliga mõõtes võiks täpsus olla parem. Testmõõtmised, kasutades Eesti GNSS püsijaamade võrkude teenuseid, on tehtud ühel punktil Mäetaguse aleviku lähedal. Testpunkti enda koordinaadid on määratud staatilise mõõtmise abil kahest erinevast lähimast tugijaamast. Tugijaama keskmine väärtus ($X=6573092,119$ m, $Y=690117,546$ m, $h=85,668$ m) on leitud programmiga Trimble Business Center. Tugijaamade koordinaadid ja baasjaama failid on saadud Trimble VRS Now ja HadNet võrgust. Võrgu RTK ja RTK testmõõtmiste välitööd on tehtud kuuel päeval (21.11-28.11.2018) Kalina külas Ida-Virumaal. Mõõtmistel kasutati Trimble, Hades ja Maa-ameti püsijaamade võrku ja nende RTK teenust. Modelleerimismeetodina on analüüsitud ja testitud VRS ja i-MAX meetodit. Samuti on testitud mõõtmist lähima püsijaama abil kasutades tavalist RTK meetodit. Testides kasutati GPS, GLONASS ja Galileo satelliitsüsteeme, Galileo oli kättesaadav ainult Trimble VRS Now võrgus. Ühel päeval koguti ühes võrgus kaks andmeseeriat: üks seeria ainult GPS signaalidega ja teine GPS, GLONASS (ja Galileo) satelliitsüsteemi signaalidega. Ühe seeria pikkus on kaks tundi ning kokku kestsid mõõtmised 4 tundi ühe teenuse tüübi kohta. Salvestati vaid üks epohh kas 1 või 5 sekundi tagant. Seega on tegemist üksiku epohhiga, mitte kesmistatud väärtusega. Enamasti viidi mõõtmisi läbi kell 11:00-16:00. Välitööde ajal kasutati GNSS vastuvõtjat Trimble R4-3 ja andmeid salvestati väliarvutisse Trimble Juno T41, kasutades tarkvara Trimble Access versiooniga 2015.

Kogutud andmed koondati tabelitesse ning loodi täpsust ja hajuvust analüüsivad diagrammid ja histogrammid programmis Microsoft Excel. MS Exceli abil on leitud

erinevate andmeseeriade keskmised väärtused, standardhälbed ning X, Y koordinaadi ja kõrguse erinevused staatilisest mõõtmisest. Histogrammid näitavad vigade jagunemist nende suuruse põhjal. Samuti on analüüsitud kõigi kolme komponendi süstemaatilist viga kas punktdiagrammi või joondigrammi abil. Kokku on tehtud 7 kahetunnilist mõõtmisseeriat RTK meetodit kasutades.

Üldiselt mõõtmised õnnestusid, mõõtmisseeriad tulid ühtlased, salvestusvoos katkestusi polnud. Küll esines parandite viivitust, seda kuni 3 sekundit. Ilmselt on see põhjustatud side probleemidest. Mõõtekohas oli Telia mobiilside hea.

Mõõtmised vaid GPS signaalide abil

Eraldi on analüüsitud mõõtmisi kasutades vaid GPS signaale. Võrreldes erinevate võrkude X koordinaadi juhuslikke vigu testpunkti alusväärtusega, siis kõige parem tulemus on saavutatud VRS teenuse kaudu võrkudes Trimble VRS Now ja Maa-amet, kus maksimaalne juhuslik viga oli vastavalt 2,4 cm ja 2,9 cm. Mõnevõrra halvem tulemus tuli Maa-ameti võrgu i-Max teenuse kaudu ($\Delta X_{\max} = 4,1$ cm). HadNet VRS teenust ja Toila üksikut baasjaama kasutades oli maksimaalne erinevus X koordinaadis vastavalt 3,3 cm ja 3 cm. Seega isegi ühe epohhi kaudu tehtud mõõtmine ei toonud kahe tunni jooksul kaasa suuremaid juhuslikke vigu kui 3 cm ja seda äärmiselt harva. Standardhälve oli vaid 6-8 mm (tabel 30), seega olulist hajuvust polnud kogu mõõtmisaja jooksul ja enamik juhuslikke vigu oli vaid mõni mm. RTK andmeseeriade keskmised väärtused erinevad staatilisest mõõtmisest 2-6 mm. Seega on kahe tunni keskmine äärmiselt täpne. Olulist süstemaatilist viga ei täheldatud.

Y koordinaadi maksimaalsed juhuslikud vead (ΔY_{\max}) on samuti väikesed, näiteks Trimble VRS Now võrgus 1,2 cm, HadNet võrgus (VRS) 1,6 cm, Maa-ameti võrgus (VRS) 1,2 cm, Maa-ameti võrgus i-MAX teenusega 2,2 cm. Kõige kehvema täpsusega on Toila baasjaama suhtes tehtud mõõtmine ($\Delta Y_{\max} = 3,8$ cm). Seega üksikul baasjaamal on olulisi puudusi juhuslike vigade osas. Seda on näha ka vaadates standardhälbeid (tabel 30). Kui muidu olid need 2,4 kuni 3,8 mm, siis Toila üksiku baasjaama suhtes tehtud mõõtmiste standardhälve oli 7,5 mm. Seega üksiku baasjaama osas kohtame siin olulist puudust, st suuremat tõenäosust saada suuremaid juhuslikke vigu. Standardhälve oli suurem ka i-MAX teenuse osas (5,9 mm), mis on võrgu ja üksiku baasjaama sümbioos. Absoluutsed vead oli mõõtmisseeriade keskmiste kaudu 2-4 mm, Toila jaama kaudu tehtud mõõtmistes 9 mm.

Kõrguse osas oli suurim juhuslik viga HadNet ja Maa-ameti VRS teenuses ($\Delta h_{\max} = 6,8$ cm), teistel mõõtmistel jäi see 5,6-5,8 cm piiresse (tabel 30). Standardhälbed oli VRS teenusel põhinevatel mõõtmistel 10 kuni 12 mm, oluliselt suurem oli standardhälve Toila üksiku baasjaama ja i-MAX teenuse kasutamisel (15,5 kuni 16,5 mm). Süstemaatiline viga oli väike, keskmised väärtused RTK seeriastest erinesid staatilisest mõõtmisest 0,3 kuni 2,6 cm (tabel 29). Keskmise ruutviga X koordinaadis on 1,9 cm, Y koordinaadis 2,6 cm ning kõrguses 28,6 cm. Ära peaks mainima Maa-ameti VRS teenuse süstemaatilist erinevust - 2,6 cm, eriti kuna samasuunaline erinevus oli ka koos GLONASS signaaliga (-3,2 cm).

Mõõtmised GNSS signaalide abil

Kui vaadata standardhälbeid, siis GLONASS signaali lisamine X ja Y koordinaadi osas pigemini halvendas standardhälvet. Aga oli ka vastupidiseid näiteid, kuigi väikses ulatuses. Kõige drastilisem näide on HadNet võrgu VRS teenuse osas, kus GLONASS signaali lisamine suurendas X koordinaadi standardhälvet 7,6 mm-lt 19,7 mm-ni. 4,5 mm osas juhtus sama ka Maa-ameti i-MAX teenust kasutades. Kui GLONASS parandas standardhälvet, siis mitte kunagi suurel määral. HadNet võrgus ja i-MAX teenuse korral on GLONASS signaalide lisamine suurendanud selgelt maksimaalseid juhuslikke vigu.

Kõrguse osas on GLONASS signaalide lisamine jällegi HadNet ja i-MAX teenuse kasutamisel suurendanud standardhälvet. Maa-ameti VRS teenuse puhul on üllatuslikult vastupidine tulemus. Oluline on mainida, et kui Trimble VRS Now võrgus standardhälve jääb GLONASS signaalide lisamisel üsna samaks, kasvab maksimaalsete juhuslike vigade arv ja väärtus (Δh_{\max} suureneb lausa 3 cm võrra). Kui tavaliselt jäävad maksimaalsed vead 5-6 cm piiresse, siis VRS Now võrgus on piir 3,5 cm kohal. Trimble VRS Now võrgus esines GLONASS signaalidega mõõtes oluline väljahüpe (umbes 5 cm) ja seda 1 minuti jooksul. Just see väljahüpe viis kõrgeks ka maksimaalse vea, standardhälve ei halvenenud, kuna ülejäänud seeria oli ühtlane. Enne väljahüpet läks parandusandmete vanud korraks 3 sekundile, mis aga taastus kohe. Täpsus taastus aga minuti pärast. Jääb mulje, nagu oleks mingi satelliit tulnud minutiks sisse. Vaadates aga satelliitide arvu, siis seda ei paista.

Üldised märkused

Andmeseeriade keskmised on veidi halvenenud GLONASS signaalide lisamisel, va HadNet VRS teenuse korral. Seega võib järeldada, et GNSS süsteemi signaalide kasutamine välitööde ajal mõjus positiivselt X ja Y koordinaadi määramise täpsusele, kuid samas andis

kehvema mõju kõrguse täpsusele. Samuti tuleks panna tähele, et võrgu RTK täpsus on suurem kui üksiku baasjaama RTK täpsus.

Siiski hakkab silma, et olulisi probleeme ei täheldatud ühegi RTK meetodi ja tugijaamade võrgu suhtes. Parandite voog oli ühtlane, märkimisväärseid katkestusi ja „väljaviskeid“ peaaegu ei esinenud. Kui vaadata andmeseeriade keskmisi, siis näeme, et X ja Y osas on vead alla 1 cm ning kõrguse osas kuni 3 cm. Kuna kõrguse referents ise võib siin 1 cm ulatuses kõikuda (näha on et vead on tabelis 29 samamärgilised), võib olla kõrguse viga tegelikult väiksem. Seega saame RTK võrke Eestis kasutada edukalt nii mõõdistusvõrgu rajamisel kui lausmõõdistuses. Mõõtmisel mitme epohhi keskmistamine ja kordusinitsialiseerimiste kasutamine suurendab täpsust siinsete testide suhtes, mis olid tehtud mõõtes üksiku epohhi abil ja ühe initsialiseerimisega.

Jätkuuuringuna tuleks taolisi mõõtmisi teha ka Eesti teistes piirkondades.

KASUTATUD KIRJANDUSALLIKAD

Emardson, R., Jarlemark, P., Bergstrand, S., Nilsson, T., Johansson, J. 2009. Measurement accuracy in Network-RTK.

Measurement Technology SP Report. SP Technical Research Institute of Sweden. Borås. 107 lk.

EUREF Permanent GNSS Network. Toila baasjaam. [veebileht]

http://www.epncb.oma.be/_networkdata/siteinfo4onestation.php?station=TOIL00EST
(14.02.2018)

European Global Navigation Satellite Systems Agency. What is GNSS? What is SBAS? [veebileht]

<https://www.gsa.europa.eu/european-gnss/what-gnss/what-sbas> (27.12.2017)

Ge, L., Rizos, C., Wu, S., Zhang, K. et al. 2013. Sparse or dense: challenges of Australian network RTK.

ResearchGate. 14 lk. [veebileht] <https://www.researchgate.net/publication/251251034>
(22.04.2018)

Gordini, C., Grgich, P.M., Hale, M.J., Kealy, A.N. 2006. Testing and evaluation of a GPS CORS Network for Real Time Centimetric Positioning - The Victoria GPSnet.

IGNSS Symposium. Holiday Inn Surfers Paradise, Australia. 15 lk

Haasdyk, J., Janssen, V. 2011. Assessment of Network RTK Performance using CORSnet – NSW.

IGNSS Symposium. University of New South Wales. Sydney, NSW, Australia. 18 lk.

Hion, T. 2012. Hades-Invest OÜ GNSS püsijaamade võrgu kasutamise teenuse hinnakiri ja arveldamise reeglid. Tallinn. 1 lk. [veebileht]

http://topcon.ee/uploads/file/GNSS%20vorgu%20Hinnakiri_04.06.2012.pdf (18.03.2018)

Hiop, J., Orle, L. 2016. Eesti erinevate RTK GNSS võrkude efektiivsuse hindamine.

Bakalaureusetöö. Eesti Maaülikooli metsandus-ja maaehitusinstituut. Tartu. 53 lk.

IAC (Information analytical Center). Globaalne Navigatsiooni Satelliitsüsteemid BeiDou, Glonass, Galileo, GPS, QZSS, IRNSS. [veebileht]

<https://www.glonass-iac.ru/guide/gnss/beidou.php> (30.12.2017)

Kirs, E. 2017. Eesti RTK GNSS võrkude täpsuse hindamine. Bakalaureusetöö.

Eesti Maaülikooli metsandus-ja maaehitusinstituut. Tartu. 58 lk.

Leica Geosystems AG. 2008. Leica AR25. 4 Constellation GNSS Antenna Revolutionary Design, Built to Last. 2 lk. [veebileht]

<https://leica-geosystems.com/products/gnss-reference-networks/antennas/leica-ar25>
(20.03.2018)

Leica Geosystems AG. Leica GR25. Don't think Receiver, think Reference Server. 8 lk. [veebileht]
http://hds.leica-geosystems.com/downloads123/zz/nrs/GR25/brochures/Leica_GR25_Brochure_en.pdf
(18.03.2018)

Leica Geosystems Limited. Leica SmartNet UK & Ireland Network RTK User Guide. Lk 3-4. [veebileht]
<http://surveyequipment.com/assets/index/download/id/142/> (10.01.2018)

Maa-ameti Geoportaal. GNSS püsijaamad. [veebileht]
<http://geoportaal.maaamet.ee/est/Andmed-ja-kaardid/Geodeetilised-andmed/Geodeetilised-vorgud/GNSS-pusijaamad-p571.html> (05.04.2018)

National Oceanic and Atmospheric Administration. [veebileht]
<http://www.oceanservice.noaa.gov/topics/navops/positioning/welcome.html> (29.12.2017)

NovAtel Inc. An Introduction to GNSS. [veebileht]
<https://www.novatel.com/an-introduction-to-gnss/chapter-5-resolving-errors/satellite-based-augmentation-systems/> (27.12.2017)

OÜ Geosoft. Trimble VRS Now tutvustus [veebileht]
<http://www.geosoft.ee/tutvustus> (21.01.2018)

OÜ I.V.A. Leon. 2009. RTK võrgud – erinevad meetodid. Lk 1-8.

OÜ "NIS". Glonass. [veebileht]
<http://www.nis-glonass.ru/about-glonass/technology/> (29.12.2017)

PennState College of Earth and Mineral Sciences: Department of Geography. Static GPS Control Surveying. [veebileht]
<https://www.e-education.psu.edu/geog862/node/1823> (05.02.2018)

Rizos, C. 2002. Network RTK Research and Implementation – A Geodetic Perspective.
Journal of Global Positioning Systems. Vol. 1, No. 2: 144-150. 7 lk.

Topcon America Corporation. 2001. Topcon Legacy-E. When Ordinary GPS Isn't Good Enough. [veebileht]
http://www.terrisgps.com/product_files/LegacyE_Brochure1_314.pdf (02.04.2018)

Topcon Totalcare. 2018. Topcon G3 A1 datasheet. [veebileht]
<http://topconcare.com/en/hardware/gnss-antennas/g3-a1/> (02.04.2018)

TransiTiva. 2015. RTK GPS/GNSS Explained. [veebileht]
<https://transitiva.com/rtk-explained/> (08.01.2018)

Trimble Inc. 2013. Datasheet Juno T41 Rugged Handheld Computer. 2 lk. [veebileht]
<https://www.trimble.com/mobile-computing/juno-t41-s-product-page.aspx> (02.02.2018.)

Trimble Inc. 2017. Datasheet Trimble Zephyr 3 antennas. 2 lk. [veebileht]

- http://intech.trimble.com/library/DS_ZEPHYR_US.pdf (15.03.2018)
- Trimble Inc. 2017. Datasheet NetR9 GNSS reference receiver series. 4 lk. [veebileht]
- <http://www.trimble.com/Infrastructure/Trimble-NetR9.aspx> (15.03.2018)
- Trimble Inc. 2013. User Guide Trimble R8-4, Trimble R6-4, Trimble R4-3 GNSS receivers. 75 lk. [veebileht]
- http://geocourse.kz/Downloads/manuals/GPS/Trimble%20R8-R6R4_v480A_UserGuide%20ENG.pdf (29.01.2018)
- Trimble Inc. 2015. Release Notes Trimble Access Software. 7 lk. [veebileht]
- <http://www.geotronics.sk/wp-content/uploads/2015/01/TA2015.pdf> (30.01.2018)
- Valdmaa, R.** 2010. Trimble VRS Now Eesti. [veebileht]
- http://www.alphagis.ee/data/img/esri10/ESRIpaevad10_Valdmaa.pdf (21.01.2018)
- Õppematerjal. 2015. Staatiliste GPS-mõõtmiste planeerimine ja läbiviimine. Õppeaine “Satelliitgeodeesia”. Lk 14.

PRECISION OF THE DATA SERIES MEASURED BY NETWORK RTK

Summary

The aim of this Master's Thesis is to study the network RTK and precision of the RTK method and its stability of the solution in different Estonian RTK reference station network. The research task is to determine the persistence of measurement precision over a longer period, the frequency of the random errors and the existence of a systematic error. Also, to find out whether precision of measurement using only GPS signals is better and the accidental errors less frequent.

Literature overview provides an overview of GNSS signals and Estonian RTN. It also brings out some of the observations that precision of measuring by only GPS signals could be better. Test measurements using the services of the Estonian GNSS base station networks have been made at one point near the Mäetaguse borough. The test point's own coordinates are determined by the static measurement from two different closest base stations. The average value of base station ($X=6573092,119$ m, $Y=690117,546$ m, $h=85,668$ m) was found by Trimble Business Center. The base station's coordinates and files are obtained from Trimble VRS Now and HadNet network. Network RTK and RTK test measurement's field work was done on six days (21.11-28.11.2018) in Kalina village in Ida-Viru county. For the measurements Trimble, Hades and Land Board reference station networks and their RTK service were used. The VRS and i-MAX methods have been analyzed and tested as a modeling method. Also have been tested measurements using nearest reference station standard RTK method have been tested. In test GPS, GLONASS and Galileo satellitesystems are used, Galileo was available only on Trimble VRS Now network. In one day two data series in one network were collected: one series only with GPS signals and other with GPS, GLONASS (and Galileo) satellitesystems signals. One series length is two hours and measurement total lasted four hours per type of service. Only one epoch was saved either 1 or 5 seconds. So it is one epoch, not average value. Mostly the measurements were carried out between 11:00 and 16:00. During the fieldwork

Trimble R4-3 GNSS receiver was used and data series was saved to Trimble Juno T41 handheld computer using software Trimble Access version 2015.

Collected data series were grouped into tables and in program Microsoft Excel graphs and histograms were created to analyze precision and dispersion. Using MS Excel average values of different data series, standard deviations and X, Y coordinates and height differences from mean of static measurement were found. Histograms show error distribution based on their size. Also all three systematic error components has been analyzed either a point diagram or linediagram. A total 9 two-hour measurement series have been performed using the RTK method.

In general the measurements were succesful, data series were homogeneous and in recording stream were no interruptions. There was a delay in upgrading up to 3 seconds. This is probably caused by communication problems. Telia's mobile communication was good at the measuring point.

Measurements using only GPS signals

Measurements using only GPS signals were analyzed separately. Comparing X coordinate random errors of different networks to against the test point value, then the best result was achieved through VRS service in the networks Trimble VRS Now and Land Board , where maximum random error was 2,4 cm and 2,9 cm respectively. A somewhat worse result came from Land Board network via i-MAX service ($\Delta X_{\max} = 4,1$ cm). Using HadNet VRS service and single Toila base station maximum difference in X coordinate was 3,3 cm and 3 cm respectively. Therefore even one epoch measuring did not result in larger random errors of more than 3 cm within two hours, and this is extremely rare. The standard deviation was only 6-8 mm (table 30), so there was no significant dispersion throughout the measurement period, and most of the random errors are only a few millimeters. The average values of the RTK series are different 2-6 mm from average of the static measurement. So the average of two hours is extremely accurate. Significant systematic error was not observed.

The Y-coordinate maximum random errors (ΔY_{\max}) are also small, for example, Trimble VRS Now network is 1,2 cm, HadNet network (VRS) 1,6 cm, Land Board network (VRS) 1,2 cm and Land Board network i-MAX service 2,2 cm. Measurement, which was made on Toila base station, has worst accuracy ($\Delta Y_{\max} = 3,8$ cm). Therefore, single reference station

has significant defects in case of random errors. This can also be seen by looking at standard deviations (table 30). Otherwise, they were 2,4 mm to 3,8 mm, standard deviation for the Toila single base station was 7,5 mm. Therefore, in the case of a single base station, we find a significant defect, i.e. greater probability of getting larger random errors. The standard deviation was also higher in case of i-MAX service (5,9 mm), which is the symbiosis of the network and the single station. Absolute errors through mean of data series were 2-4 mm and 9 mm in measurements which were made through Toila station.

In case of height, the highest random errors were in HadNet and Land Board VRS service ($\Delta h_{\max} = 6,8$ cm), while in other measurements it remained within the range 5,6-5,8 cm (table 30). Standard deviations were 10 mm to 12 mm in measurements, which are based on VRS service. The standard deviation was significantly higher when using single Toila base station and i-MAX service (15,5 to 16,5 mm). The systematic error was small, RTK series mean values differed from static measurement 0,3 to 2,6 cm (table 29). Therefore average square error in X coordinate is 1,9 cm, Y coordinate 2,6 cm and height 28,6 cm. Should mention that Land Board VRS service systematic difference is -2,6 cm, especially since same directional difference was also present with GLONASS signals (-3,2 cm).

Measurements using GNSS signals

When looking at standard deviations, then adding a GLONASS signals in case of X and Y coordinates rather undermined the standard deviation. But there were also opposite examples, although a small extent. The most drastic example is in HadNet network's VRS service, where GLONASS signal addition increased X coordinate standard deviation from 7,6 mm to 19,7 mm. Same happened in the case of 4,5 mm using Land Board i-MAX service. If GLONASS corrected the standard deviation it never came to a large extent. In HadNet network and i-MAX service GLONASS signals addition clearly increased the maximum random errors.

In case of height, addition of GLONASS signals again increased the standard deviation when using HadNet and i-MAX. Land Board's VRS service had surprisingly opposite result. It is important to note that, if the standard deviation of the Trimble VRS Now network remains fairly consistent with the addition of GLONASS signals, the number and value of maximum random errors will increase (Δh_{\max} increases by as much as 3 cm). If maximum errors are usually in the range of 5-6 cm, then the Trimble network has a limit of 3,5 cm. In Trimble VRS Now network a significant leap (ca 5 minutes) within 1 minute

occured by using GLONASS signals. This leap lead to high maximum error, standard deviation did not deteriorate, because other seria was steady. Before the leap, correction data went off for a little while for 3 seconds, but recovered right away. Accuracy returned after a minute. It seems like one of the satellites came in view for a minute. After looking at the number of satellites it does not stand out.

General comments


The average of the data series is somewhat worse when GLONASS signals are added, except for the HadNet VRS service. Thus, it can be concluded that the use of signals from the GNSS system during the fieldwork positively influenced the precision of X and Y coordinate, but at the same time had a worse effect on the precision of height. Also should be noted that the network RTK precision is greater than the precision of the single base station's RTK.

However no significant problems were observed regards to any RTK method and base station network. The stream of corrections was even, significant interruptions and „leap“ almost did not occur. Looking at mean value of data series we can see X, Y coordinate errors are less than 1 cm and errors of height are up to 3 cm. As the height reference itself can fluctuate here at 1 cm (it is seen that the errors are with the same mark in table 29), the error of the height may actually be lower. Therefore, we can successfully use RTK networks in Estonia in both cases such as construction of a survey network and in standard measurements. In measurements averaging of many epochs and use of repeat initialisations increases precision of the local tests, which were made by a single epoch measuring and one initialization.


Such measurements should be carried out in other regions of Estonia as a follow-up study.

LISAD

Lisa 1. Trimble Zephyr 3 tehnilised parameetrid. Allikas: Trimble Inc


Spetsifikatsioonid	Parameetrid	Pilt
Mõõtmed (cm)	34,3 (diameeter) ×7,9 (kõrgus)	
Kaal (kg)	1,36	
Sisendpinge	3,5 V DC – 20 V DC (direct current ehk alalisvool)	
Sisendvool	125 mA	
Töö-ja hoiutemperatuur	-40 ⁰ C kuni +75 ⁰ C	
Kitsasriba režiim (1555 kuni 1559 MHz)	6,4 V DC – 9 V DC	
Lairiba režiim (1525 kuni 1559 MHz)	3,5 V DC – 6,0 V DC; 9,4 V DC – 20 V DC	
Signaalide vastuvõtt	50 dB	
GNSS süsteemide signaalide jälgivus	<ul style="list-style-type: none">• GPS: L1, L2, L5• GLONASS: L1, L2, L3• Galileo: E1, E2, E5, E6• BeiDou: B1, B2, B3• QZSS	
SBAS süsteemi tugi	WAAS, EGNOS, GAGAN, MSAS, OmniSTAR, Trimble RTX	
Omadused	<ul style="list-style-type: none">• Kvaliteetne signaalide jälgimine isegi alla 5⁰ satelliidi kaldenurga korral• 100% niiskusekindel• pöörutuskindlus vastab MIL-STD-810-F standardile (ehk on töötamisvõimeline pärast kukkumist betoonile 2 m kõrguselt)• vibratsioonikindlus vastavalt MIL-STD-810-F standardile igal teljel	

Lisa 2. Trimble NetR9 tehnilised parameetrid. Allikas: Trimble Inc


Spetsifikatsioonid	Parameetrid	Pilt
Mõõtmed (cm)	26,5 × 13,0 × 5,5	
Kaal (kg)	1,75	
Sisemine aku	Tööaeg: 15 h (sõltuvalt kasutaja poolsest seadistusest)	
	7,4 V; 7800 mA/h; Li-Ion	
Töö-ja hoiutemperatuur	-40 ⁰ C kuni +65 ⁰ C -40 ⁰ C kuni +80 ⁰ C	
Omadused	Tolmu-ja veekindlus(kaitse korraks 1m sügavusele kastmise eest); niiskus – 100% kondenseeruv	
Antenni toetus		
Väljundpinge	5,0 V DC nominaalne	
Maksimaalne väljundvool	150 mA	
Kaablite max kaotus	12 dB	
Sobivad antenni tüübid	<ul style="list-style-type: none"> • Trimble Zephyr 3 Geodetic • Trimble GNSS Choke Ring • Trimble GNSS-Ti Choke Ring • Ag25 (kasutada ainult Ti-M variandiga) 	
Elektrilised omadused	<ul style="list-style-type: none"> • Kasutaja poolt konfigureeritavad toite-ja väljalülituspinge • Sisemine aku UPS töötab kui juhtub toiteallika(elektrienergia) katkestus • Vastuvõtja nominaalne energiatarve on 3,8 W • Välise ja sisemise aku(toiteallika) sujuv vahetus 	
GNSS süsteemide signaalide tugi	<ul style="list-style-type: none"> • GPS: L1 C/A, L2C, L2E (Trimble meetod krüpteeritud L2P jälgimiseks), L5 • GLONASS: L1 C/A, L1P, L2 C/A, L2P, L3 CDMA2 • Galileo: L1 CBOC, E5A, E5B AltBOC <ul style="list-style-type: none"> • BeiDou: B1, B2, B3 • QZSS: L1 C/A, L1C, L1 SAIF, L2C, L5, LEX5 	
SBAS süsteemi tugi	WAAS, EGNOS, GAGAN, MSAS, OmniSTAR, Trimble RTX	
Sisendi- ja väljundiformaadid	Paranditeformaadid: CMR, CMR +, CMRx, RTX, RTCM 2.1-3.2 ja MSM	
	Jälgimisformaadid: RT17, RT27, BINEX, RTCM 3.x	
	Asukoha/seisukorra: NMEA-0183 v2.30, GSOF	
Asukoha määramine	Täpsused	
Koodi diferentsiaalne	horisontaalne	0.25 m + 1 ppm rms

GNSS positsioneerimine (<i>Code differential GNSS positioning</i>)	vertikaalne	0.50 m + 1 ppm rms
WAAS-i diferentsiaalne positsioneerimine (WAAS <i>differential positioning accuracy</i>)	horisontaalne	0.50 m rms
	vertikaalne	0.85 m rms
Kõrgtäpne staatiline (<i>High-precision static</i>)	horisontaalne	3 mm + 0.1 ppm rms
	vertikaalne	3.5 mm + 0.4 ppm rms
Staatiline(<i>Static</i>) ja kiirstaatiline(<i>Fast-Static</i>)	horisontaalne	3 mm + 0.5 ppm rms
	vertikaalne	5 mm + 0.5 ppm rms
Postprotsessi kinemaatiline (<i>Postprocessed Kinematic – PPK</i>)	horisontaalne	8 mm + 1 ppm rms
	vertikaalne	15 mm + 1 ppm rms
Reaalaja kinemaatiline (<i>Real Time Kinematic</i>) üksik baasjoon < 30 km	horisontaalne	8 mm + 1 ppm rms
	vertikaalne	15 mm + 1 ppm rms
RTK võrk (<i>Network RTK</i>)	horisontaalne	8 mm + 0.5 ppm rms
	vertikaalne	15 mm + 0.5 ppm rms


Lisa 3. Topcon G3 A1 tehnilised parameetrid. Allikas: Topcon

Spetsifikatsioonid	Parameetrid	Pilt
Mõõtmed (mm-tes)	141,6×141,6 (maapinna tasanduseta)	
Kõrgus (mm-tes)	53,7 149,5 (lumevastase kupliga)	
Kaal (kg)	0,515 (antenn maapinna tasanduseta) 0,185 (maapinna tasandus) 0,700 (antenn koos maapinna tasandusega) 0,195(lumevastane kuppel) 0,895 (antenn maapinna tasandusega ja lumevastase kupliga)	
Töö-/ hoiutemperatuur	-50 ⁰ C kuni +70 ⁰ C -55 ⁰ C kuni +85 ⁰ C	
Toidepinge	+3 kuni +8 V DC	
Omadused	Tolmu-ja veekindel. Põrutuskindel 2 m kõrguselt	
Töösageduse vahemik	<ul style="list-style-type: none"> L1 GPS/GLONASS 1586.5 ± 25 MHz L2 GPS/GLONASS 1236 ± 20 MHz L5 GPS 1176 ± 12 MHz 	
Jälgivus/tulemus (<i>Gain</i>) seniidis (90 ⁰)	<ul style="list-style-type: none"> GPS L1 6 dBic (min) GPS L2 5.5 dBic (min) GPS L5 4 dBic (min) GLONASS L1 4.5 dBic (min) GLONASS L2 4 dBic 	
Jälgivus/tulemus (<i>Gain</i>) seniidist horisondini (90 ⁰ -180 ⁰)	<ul style="list-style-type: none"> GPS L1 -12 dB GPS L2 -13 dB GPS L5 -13 dB GLONASS L1 -12 dB GLONASS L2 -13 dB 	


Lisa 4. Topcon Legacy-E tehnilised parameetrid. Allikas: Topcon

Spetsifikatsioonid	Parameetrid	Pilt
Mõõtmed (mm-tes)	240×110×35	
Kaal (kg)	0,6	
Töötemperatuur	-40 ⁰ C kuni +55 ⁰ C	
Aku omadused	<ul style="list-style-type: none">Toite sisend: 6 kuni 28 V DCTööaeg: 7 tundiLiitiumiooni aku	
Andmevoog	<ul style="list-style-type: none">Reaalaja andmete väljund: RTCM 104 ver 2.2 ja/või CMR2ASCII väljund: NMEA 0183 ver 2.2 ja ver 2.3(vaikimisi) Väljundi vahemik: üle 20 korda sekundis (20 Hz)	
Sisemälu	Üle 96 MB	
Omadused	veekindel	
Jälgitavad kanalid	Standardne	40 L1 GPS (20 GPS L1+L2+GLONASS)
	Valikuline	<ul style="list-style-type: none">20 GPS L1+L2 (GD)<ul style="list-style-type: none">20 GPS L1+GLONASS (GG)20 GPS L1+L2+GLONASS (GGD)
Jälgitavad signaalid	L1/L2 C/A ja P kood ja kandja	
Asukoha määramine	Täpsus	
Baasjoone täpsus	horisontaalne	3 mm+1ppm L1+L2 jaoks 5 mm+1,5 ppm L1 jaoks
	vertikaalne	5 mm+1,5 ppm L1+L2 jaoks 6 mm+1,5 ppm L1 jaoks
RTK (OTF) täpsus	horisontaalne	10 mm+1,5 ppm L1+L2 jaoks 15 mm+2 ppm L1 jaoks
	vertikaalne	15 mm+1,5 ppm L1+L2 jaoks 20 mm+2 ppm L1 jaoks


Lisa 5. Leica GR25 tehnilised parameetrid. Allikas: Leica Geosystems

Spetsifikatsioonid	Parameetrid	Pilt
Mõõtmed (mm-tes)	220×200×94 (sh eemaldatavad kummist kaitserauad)	
Kaal (kg)	1,84 (ilma akuta) ja 2,29 (akuga)	
Aku omadused	12 V DC (nominaalne), vahemik 10,5 – 28 V DC. Vastuvõtjal on 2 välist toite sisendit Olemas sisemine Li-Ion aku ja siseehitatud laadija	
Energia tarbimine	tavaliselt 3,1 W; 24V/150mA. 24 tunnine varu, kasutades GEB 242 sisemist aku	
Töö-/hoiutemperatuur	-40 ⁰ C kuni +65 ⁰ C / -40 ⁰ C kuni +85 ⁰ C	
Omadused	On kaitstud liiva, tolmu ja vihma eest. Peab vastu ajutise veesse sukeldumist (maksimaalselt 1 m sügavusele)	
SBAS süsteemide tugi	WAAS, EGNOS, GAGAN, MSAS	
GNSS süsteemide satelliitide tugi	<ul style="list-style-type: none">• GPS: L1 C/A, L2P, L2C, L5• GLONASS: L1 C/A, L2P, L2C• Galileo: E1, E5a, E5b, AltBOC<ul style="list-style-type: none">• BeiDou: B1, B2, B3• QZSS: L1, L2C, L5	
Andmete sisestamine	Kuni 32 GB eemaldatav SD kaart, 12 paralleelset logimisseanssi. Andmekiirus kuni 50 Hz. Andmete sisendformaadid: RINEX versioon 2.11, 3.01 ja 3.02 ning Hatanaka, Leica MDB vormingud, sealhulgas ka ZIP-pakkimine.	
Andmevoog	Kuni 20 paralleelselt andmevoogu mitme ühendusega. Andmekiirus kuni 50 Hz. Andmete väljundformaadid: Leica, Leica 4G, CMR, CMR +, RTCM v2.1 / 2.2 / 2.3 / 3.2, BINEX, NMEA 0183 V2.20, Ntrip ning eravormingut – TCPIP	
Asukoha määramine	Täpsus	
Väga madala müratasemega GNSS kandja faasi mõõtmised	< 0,2 mm (rms)	
Fikseeritud RTK positsioneerimine	horisontaalne	10 mm + 1 ppm (rms)
	vertikaalne	20 mm + 1 ppm (rms)


Lisa 6. Leica AR25 tehnilised parameetrid. Allikas: Leica Geosystems

Spetsifikatsioonid	Parameetrid	Pilt
Mõõtmed (mm)	380×200	
Kaal (kg)	7,6	
Töö-/ hoiutemperatuur	-55 ⁰ C - +85 ⁰ C / -55 ⁰ C - +90 ⁰ C	
Toidepinge ja takistus	3,3 – 12 V DC Nominaalne takistus 50 oomi	
GNSS signaalide jälgivus	<ul style="list-style-type: none">• GPS: L1, L2, L2c, L5• GLONASS: L1, L2, L3• Galileo: E2-L1-E1, E5a, E5b, E6, AltBOC• BeiDou: B1, B2, B3, L5• L-Band hõlmab endas SBAS, OmniSTAR ja CDGPS	
Omadused	Kaitstud niiskuse eest 100% Kaitstud liiva, tolmu ja tuule puhumisest. Peab vastu ajutise veesse sukeldumist (sügavus max 1 m)	
Antenni kaablid	Kättesaadavad pikkusega 1,2; 2,8; 10; 30; 50 ja 70 meetrit (soovi korral on olemas ka pikemad kaablid)	

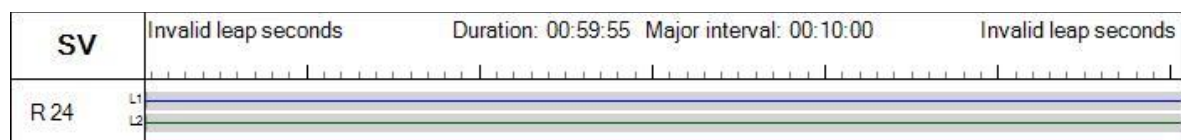
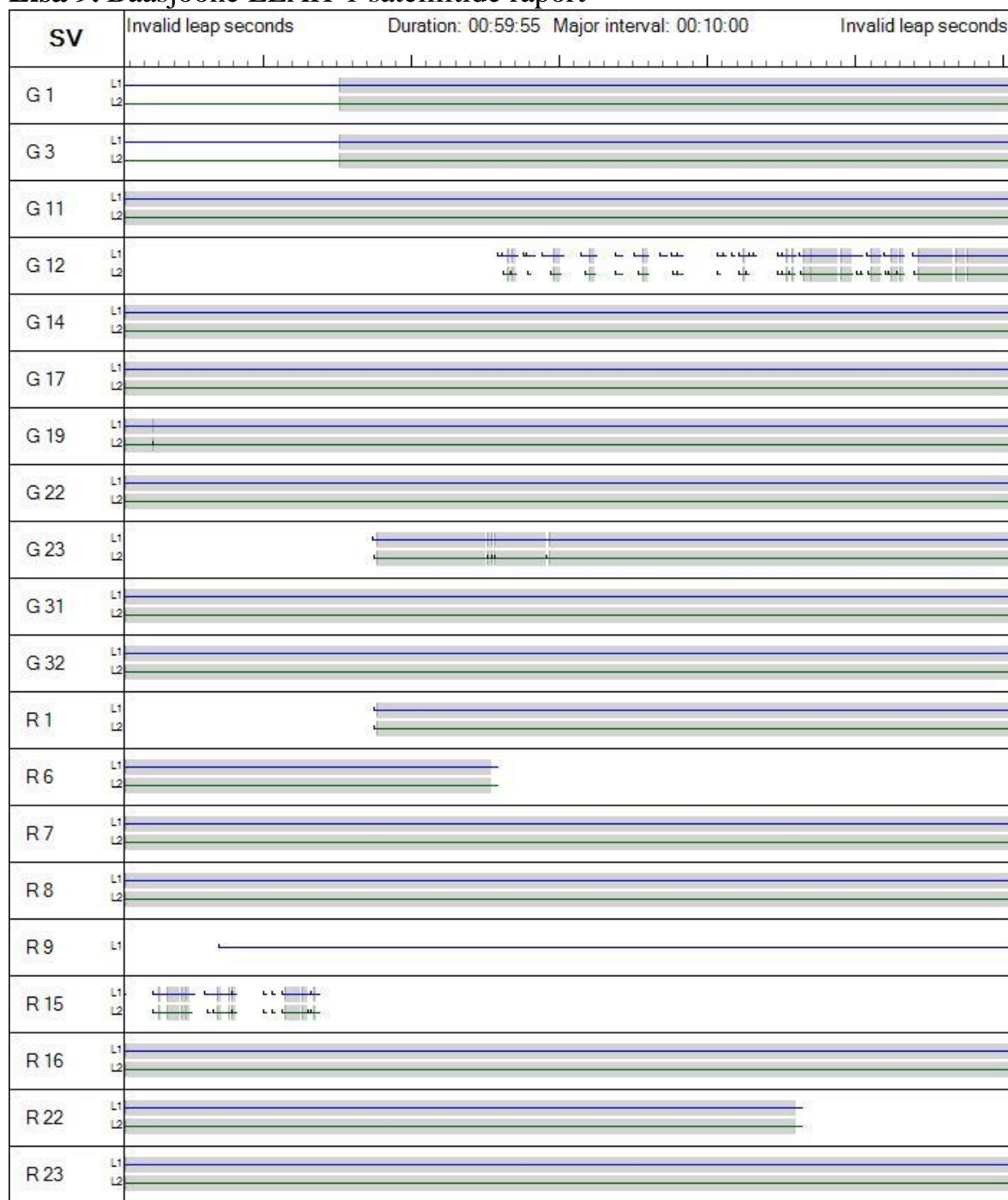
Lisa 7. Trimble R4-3 tehnilised parameetrid. Allikas: Trimble Inc

Näitajad	Parameetrid	Pilt
Mõõtmmed (cm)	19,0 ×10,4	
Kaal (kg)	1,52	
Aku tööaeg	2,5 h – 4,7 h	
Töö-ja hoiutemperatuur	-40 ⁰ C kuni 65 ⁰ C -40 ⁰ C kuni 75 ⁰ C	
Omadused	Tolmu-ja veekindlus(kaitse korraks 1m sügavusele kastmise eest); Bluetooth tugi	
GNSS süsteemide signaalide tugi	<ul style="list-style-type: none">• GPS: L1 C/A, L1C, L2C, L2E• GLONASS: L1 C/A, L1P, L2 C/A, L2P, L3(valikuline)• Galileo: E1, E5A, E5B(valikuline)• BeiDou: B1, B2(valikuline)	
SBAS süsteemi tugi	QZSS, WAAS, EGNOS, GAGAN	
Sisendi- ja väljundiformaadid	<ul style="list-style-type: none">• Trimble format – CMR, CMR+, CMRx• RTCM SC-104 – RTCM 2.1; 2.3; 3.0; 3.1<ul style="list-style-type: none">• 23 NMEA väljundit• GSOE, RT17 ja RT27• BINEX-i tugi	
Mõõtmismeetod	Täpsus	
Koodipõhine GNSS positsioneerimine (Code differential GNSS positioning)	horisontaalne	0.25 m + 1 ppm rms
	vertikaalne	0.50 m + 1 ppm rms
Kõrgtäpne staatiline (High-precision static)	horisontaalne	3 mm + 0.1 ppm rms
	vertikaalne	3.5 mm + 0.4 ppm rms
Staatiline(Static) ja kiirstaatiline(Fast-Static)	horisontaalne	3 mm + 0.5 ppm rms
	vertikaalne	5 mm + 0.5 ppm rms
Järeeltöötlusega kinemaatiline (Postprotcessed Kinematic – PPK)	horisontaalne	8 mm + 1 ppm rms
	vertikaalne	15 mm + 1 ppm rms
Reaalaja kinemaatiline, üksik baasjoon < 30 km	horisontaalne	8 mm + 1 ppm rms
	vertikaalne	15 mm + 1 ppm rms
Võrgu RTK	horisontaalne	8 mm + 0.5 ppm rms
	vertikaalne	15 mm + 0.5 ppm rms

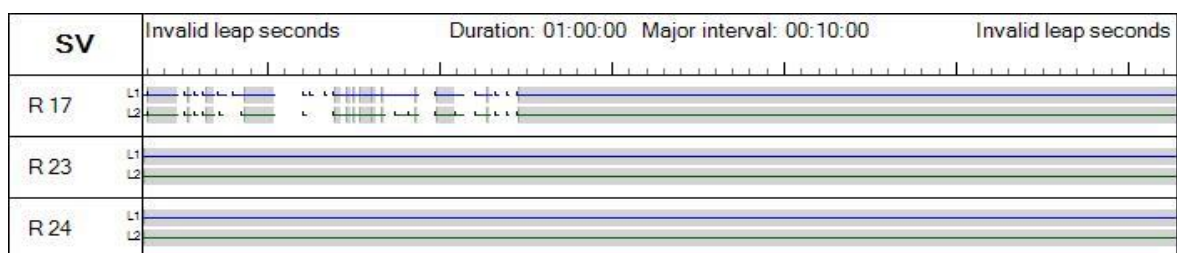
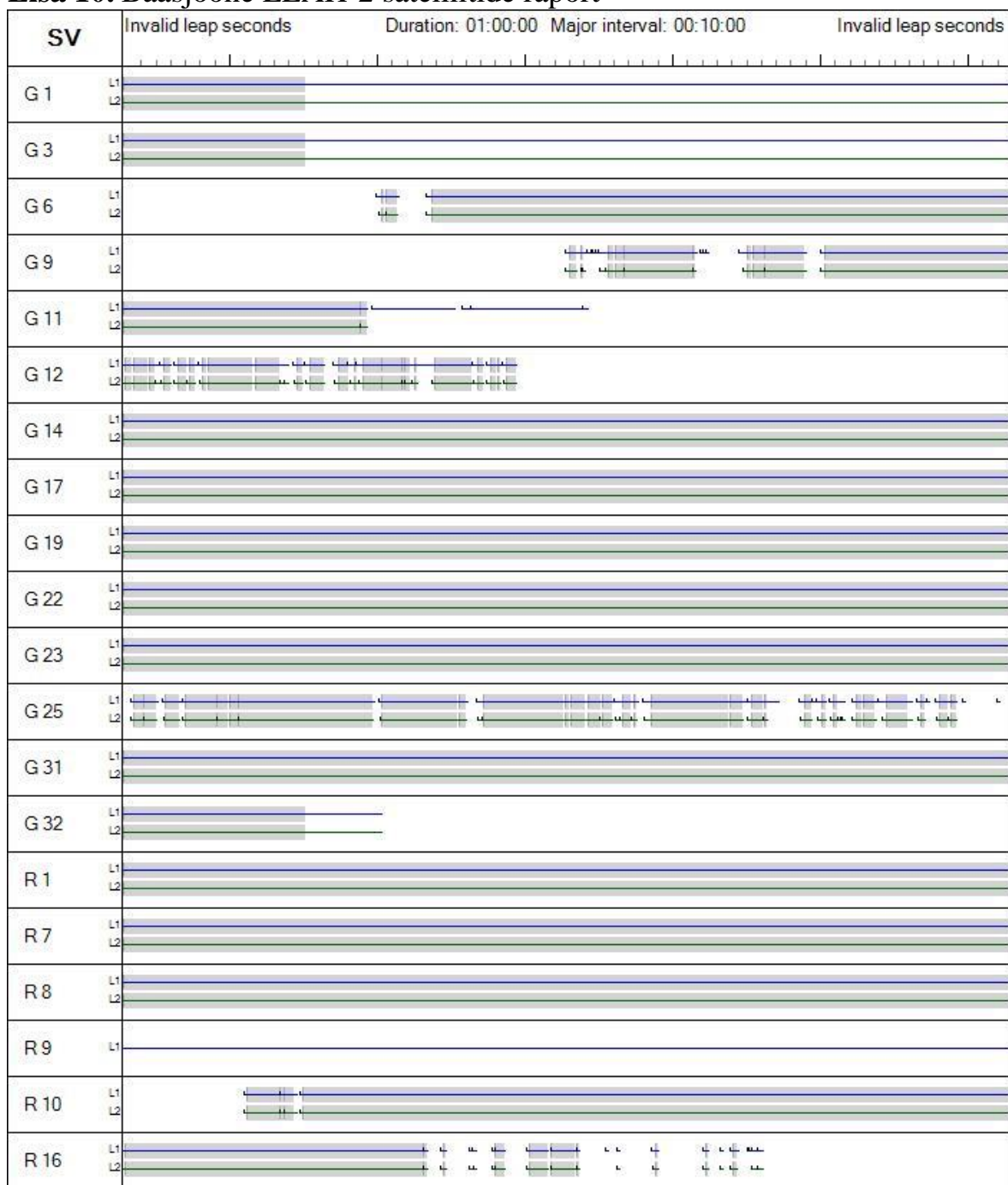
Lisa 8. Väliarvuti Trimble Juno T41 tehnilised parameetrid. Allikas: Trimble Inc

Näitajad	Parameetrid	Pilt
Mõõtmed (mm)	155×82×25	
Kaal (kg)	0,405	
Sisemälu (RAM)	512 MB	
Lisamälu	8 – 16 GB	
Aku tööaeg/laadimisaeg	4 h/8 h	
Töö-ja hoiutemperatuur	-30 ⁰ C kuni 60 ⁰ C -40 ⁰ C kuni 70 ⁰ C	
Sisemise GPS-i täpsus	2 – 4 m	
SBAS süsteemi tugi sisemisele GPS-le	WAAS, EGNOS	
Omadused	Tolmu-ja veekindlus Bluetooth ja Wi-Fi tugi	

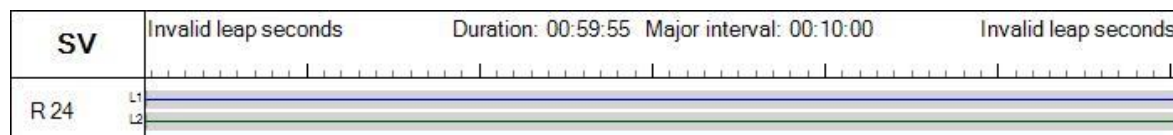
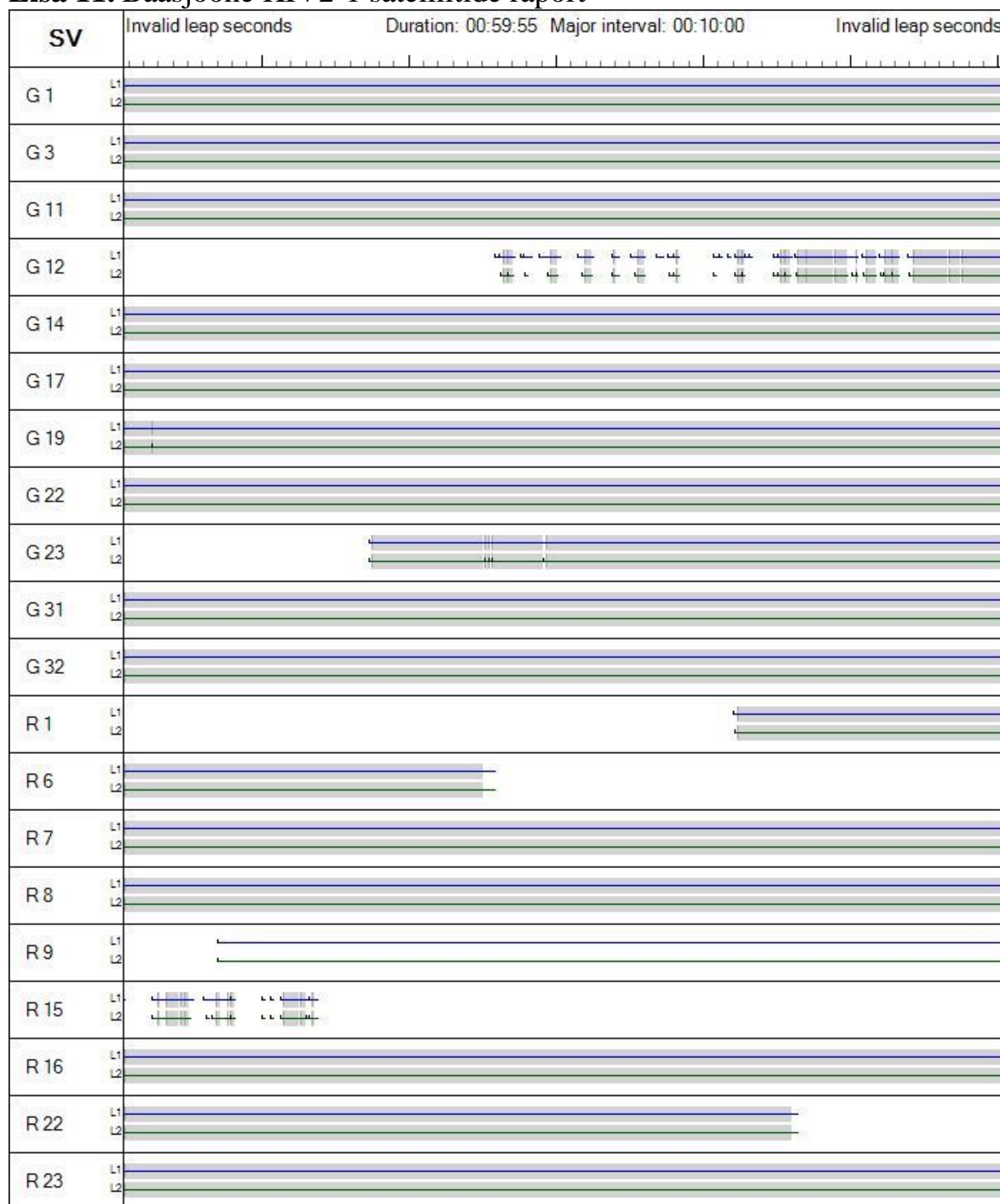
Lisa 9. Baasjoone EEAH-1 satelliitide raport



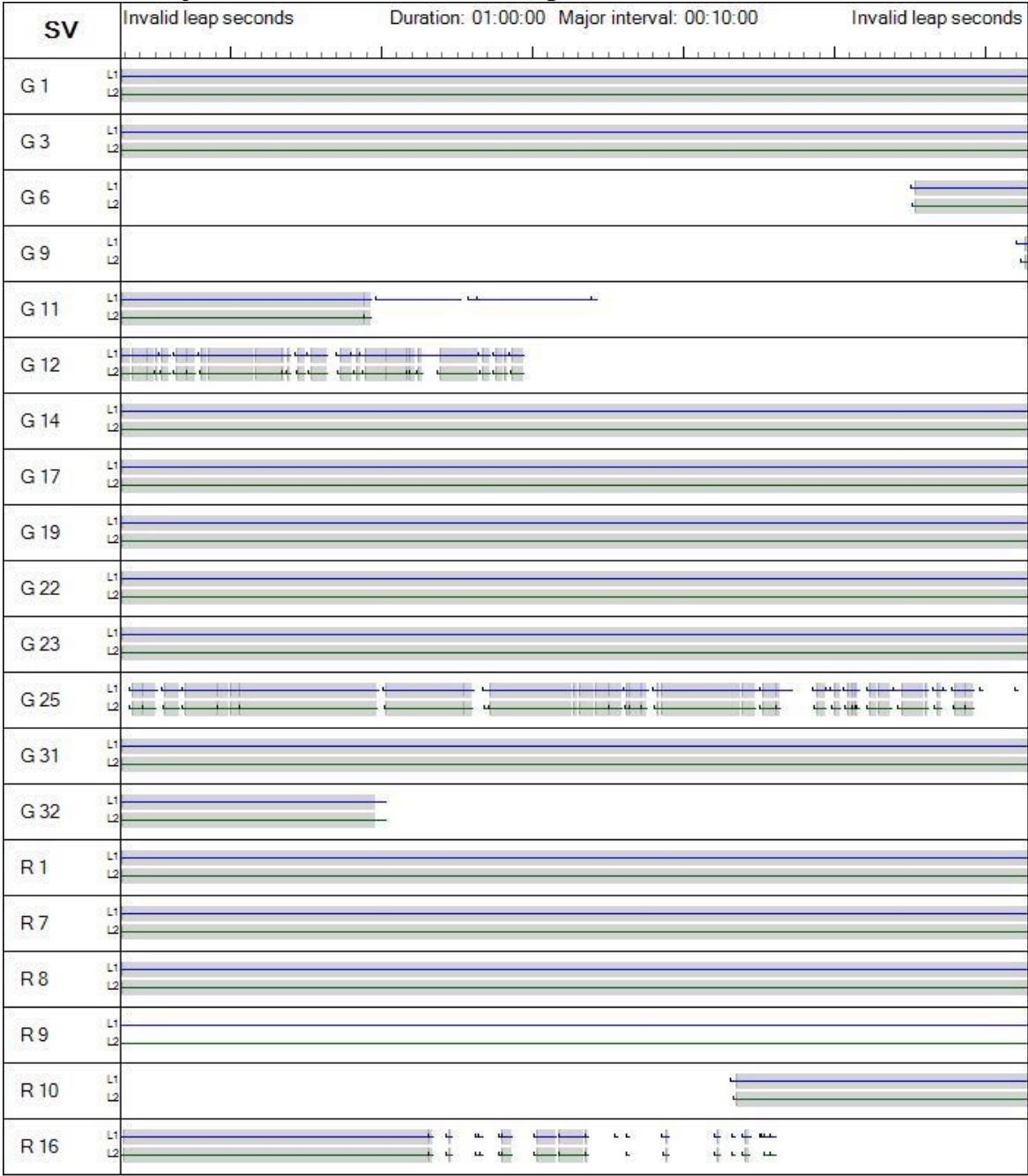
Lisa 10. Baasjoone EEAH-2 satelliitide raport



Lisa 11. Baasjoone KIV2-1 satelliitide raport



Lisa 12. Baasjoone KIV2-2 satelliitide raport



Lisa 13. Mõõtmisdetailid (Survey raport) Trimble VRS Now võrku kasutades (GNSS)

Point	357	X	2903905.882	Y	1500986.034	Z	5458508.523	Code	
		Method	Fixed	Type	Continuous	Search class	Normal		
Antenna height	1.714	Type	Uncorrected	Hz Prec	0.004	Vt Prec	0.008		
QC 1		Satellites	29	PDOP	1.1	HDOP	0.5	VDOP	0.9
		Base data age	1	RMS	14.628	Positions used	1		
Point	358	X	2903905.884	Y	1500986.035	Z	5458508.525	Code	
		Method	Fixed	Type	Continuous	Search class	Normal		
Antenna height	1.714	Type	Uncorrected	Hz Prec	0.004	Vt Prec	0.008		
QC 1		Satellites	29	PDOP	1.1	HDOP	0.5	VDOP	0.9
		Base data age	2	RMS	15.601	Positions used	1		
Point	359	X	2903905.883	Y	1500986.036	Z	5458508.524	Code	
		Method	Fixed	Type	Continuous	Search class	Normal		
Antenna height	1.714	Type	Uncorrected	Hz Prec	0.005	Vt Prec	0.009		
QC 1		Satellites	29	PDOP	1.1	HDOP	0.5	VDOP	0.9
		Base data age	3	RMS	16.521	Positions used	1		
Point	360	X	2903905.902	Y	1500986.046	Z	5458508.582	Code	
		Method	Fixed	Type	Continuous	Search class	Normal		
Antenna height	1.714	Type	Uncorrected	Hz Prec	0.005	Vt Prec	0.010		
QC 1		Satellites	29	PDOP	1.1	HDOP	0.5	VDOP	0.9
		Base data age	1	RMS	18.386	Positions used	1		
Point	361	X	2903905.896	Y	1500986.048	Z	5458508.581	Code	
		Method	Fixed	Type	Continuous	Search class	Normal		
Antenna height	1.714	Type	Uncorrected	Hz Prec	0.004	Vt Prec	0.008		
QC 1		Satellites	29	PDOP	1.1	HDOP	0.5	VDOP	0.9
		Base data age	1	RMS	14.932	Positions used	1		
Point	362	X	2903905.901	Y	1500986.049	Z	5458508.579	Code	
		Method	Fixed	Type	Continuous	Search class	Normal		
Antenna height	1.714	Type	Uncorrected	Hz Prec	0.004	Vt Prec	0.008		
QC 1		Satellites	29	PDOP	1.1	HDOP	0.5	VDOP	0.9

		Base data age	1	RMS	14.919	Positions used	1		
Point	363	X	2903905.897	Y	1500986.047	Z	5458508.566	Code	
		Method	Fixed	Type	Continuous	Search class	Normal		
Antenna height	1.714	Type	Uncorrected	Hz Prec	0.005	Vt Prec	0.009		
QC 1		Satellites	29	PDOP	1.1	HDOP	0.5	VDOP	0.9
		Base data age	1	RMS	16.662	Positions used	1		
Point	364	X	2903905.896	Y	1500986.048	Z	5458508.566	Code	
		Method	Fixed	Type	Continuous	Search class	Normal		
Antenna height	1.714	Type	Uncorrected	Hz Prec	0.005	Vt Prec	0.009		
QC 1		Satellites	29	PDOP	1.1	HDOP	0.5	VDOP	0.9
		Base data age	2	RMS	17.649	Positions used	1		

**Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning
juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Mina, Margarita Svežova,
sünniaeg 29.03.1992,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda koostatud lõputöö

Võrgu RTK mõõteseeriade täpsus,

mille juhendaja on dotsent Harli Jürgenson, *PhD*

1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,

1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja

1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega
isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor _____

(allkiri)

Tartu, _____

(kuupäev)

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)